

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

О.А. НОВОХАТ
В.М. МАРЧЕВСЬКИЙ

ПРОЦЕС СУШІННЯ ФЛЮТИНГУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
ЕНЕРГІЇ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

МОНОГРАФІЯ

Київ 2018

Процес сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання [Електронний ресурс]: моногр. / О.А. Новохат, В.М. Марчевський. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018 – 201 с.

*Гриф надано Вченою Радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(Протокол №6 від 4 червня 2018 р.)*

Відповідальний редактор: Корнієнко Ярослав Микитович, проф., д.т.н.

Рецензенти:

Мороз Валентина Миколаївна, виконавчий директор Асоціації виробників гофрокартону, с.н.с., к.т.н.

Собченко Віктор Васильович, старший науковий співробітник Інституту газу НАН України, відділ термічних гетерогенних процесів, к.т.н.

Новохат Олег Анатолійович

Марчевський Віктор Миколайович

ПРОЦЕС СУШІННЯ ФЛЮТИНГУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕНЕРГІЇ
ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	10
1 ПРОБЛЕМИ ТА ОСОБЛИВОСТІ СУШІННЯ ПАПЕРУ ДЛЯ ГОФРУВАННЯ (ФЛЮТИНГУ) ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕНЕРГІЇ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	11
1.1 Флютинг як складова гофрокартону	11
1.2 Обладнання для сушіння флютингу	14
1.3 Моделювання процесу сушіння флютингу	25
1.4 Висновки і завдання дослідження	36
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ФЛЮТИНГУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕНЕРГІЇ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ	39
2.1 Фізична модель процесу	39
2.2 Математичне моделювання процесу	43
2.3 Вибір методів розв’язання математичного описання процесу	59
2.3 Результати числового моделювання та їх аналіз.....	69
2.4 Висновки	76
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ФЛЮТИНГУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕНЕРГІЇ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	77
3.1 Мета і завдання експериментальних досліджень.....	77
3.2 Опис експериментальної установки та методики дослідження	77
3.3 Контрольовані фізичні величини і засоби їх вимірювання	81
3.4 Флютинг для дослідження	82
3.5 Дослідження процесу сушіння флютингу	83
3.5.1 Дослідження впливу густини теплового потоку на кінетику сушіння	85
3.5.2 Дослідження впливу маси квадратного метру флютингу на кінетику сушіння.....	90
3.5.3 Дослідження впливу початкового вологовмісту флютингу на кінетику сушіння	94
3.6 Визначення коефіцієнтів вологообміну за періодами сушіння	97
3.7 Перевірка адекватності математичної моделі	98
3.7 Висновки	101
4 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ ФЛЮТИНГУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕНЕРГІЇ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	103
4.1 Алгоритм розрахунку установки інфрачервоних випромінювачів	103
4.2 Розробка обладнання для сушіння флютингу	105

4.3 Визначення питомих затрат на сушіння флютингу	108
4.3 Зменшення викидів продуктів згорання в навколишнє середовище.....	112
4.4 Висновки	114
ВИСНОВКИ	115
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	117
Додаток А Результати експериментального дослідження процесу нагрівання робочої поверхні дослідного інфрачервоного випромінювача	131
Додаток Б Результати експериментальних досліджень процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання	134
Додаток В Визначення товщини флютингу	173
Додаток Г Розрахунок похибок вимірювання	175
Додаток Д Перевірка адекватності математичної моделі	188
Додаток Е Розрахунок економічного ефекту від застосування енергії інфрачервоного випромінювання	192
Додаток Ж Визначення зменшення кількості викидів вуглекислого газу в навколишнє середовище	199

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

Умовні позначення:

c – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К);

ρ – густина, кг/м³;

T – абсолютна температура, К;

t – температура, °С;

τ – час, с;

m – маса, кг;

q – густина теплового потоку, Вт/м²;

q_v – об’ємний тепловий потік, Вт/м³;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹;

x, y, z – декартові координати, м;

K_v – спектральний коефіцієнт поглинання, м⁻¹;

n_v – показник заломлення;

Ω – тілесний кут, ср;

I – функція Планка, Вт·с/(м²·ср);

ν_b – частота випромінювання, Гц;

k_{ij} – загальні коефіцієнти тепло- й масопереносу, $i, j = 1, 2, 3$;

a_m – коефіцієнт дифузії вологи, м²/с;

a_m^T – коефіцієнт термодифузії вологи, м²/К·с;

δ_T – термоградієнтний коефіцієнт переносу вологи, К⁻¹;

k_p – коефіцієнт фільтраційного переносу вологи, м²/К·с;

j – потік вологи всередині флютингу, кг/м²·с;

ε – коефіцієнт фазового перетворення рідини в пар;

j_3 – потік вологи з поверхні флютинга назовні, кг/м²·с;

β – коефіцієнт вологообміну в періоді нагрівання та постійної швидкості сушіння, с/м;

μ – хімічний потенціал, Дж/моль;

p_n – тиск насиченої пари, Па;

p_p – парціальний тиск пари, Па;

φ – відносна вологість повітря;

$w_{\text{суш}}$ – швидкість сушіння флютингу на всій тривалості процесу, кг/(кг·с);

N – швидкість сушіння в періоді постійної швидкості, кг/(кг·с);

R_V – відношення об'єму тіла до його поверхні;

β_2 – коефіцієнт вологообміну в другому періоді сушіння, м/с;

u – вологовміст, кг/кг;

g – маса квадратного метру флютингу, кг/м²;

k – константа сушіння в другому періоді, с⁻¹;

λ_{max} — довжина хвилі променів з максимальною інтенсивністю, м;

r – масова теплота випаровування води, Дж/кг;

ε_{pr} – приведений ступінь чорноти;

F – площа поверхні, м²;

w – вологість матеріалу;

s – сухість матеріалу;

δ – товщина шару, м;

\mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі до поверхні;

α_k – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м²·К);

α_b – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м²·К);

l – визначальний розмір, м;

\bar{H} – геометричний коефіцієнт;

H – відстань між поверхнями інфрачервоного випромінювача та флютингу;

Ra – число Релея;

Pr – число Прандтля;

Gr – число Грасгофа;

Nu – число Нусельта;

Re – число Рейнольдса;

ν – кінематична в'язкість, м²/с;

β_p – температурний коефіцієнт об'ємного розширення, К⁻¹;

n – кількість сіткових вузлів;

U – напруга, В;

W – потужність, Вт;

Q_p^H – нижча питома теплота згорання палива, МДж/м³.

Основні індекси:

r – стосується радіаційного потоку;

λ – стосується переносу тепла теплопровідністю;

IR – стосується робочої поверхні інфрачервоного випромінювача;

p – стосується поверхні флютингу;

nc – стосується навколишнього середовища;

eff – стосується середнього значення величини системи тіл;

i – стосується виду фази;

air – стосується повітря;

f – стосується флютингу;

$асф$ – стосується абсолютно сухого флютингу;

w – стосується вологи;

0 – стосується скелета матеріалу;

p – стосується рівноважного стану;

z – стосується координати по товщині флютингу;

S_1 – стосується оточуючого середовища, що прилягає до верхньої сторони флютингу;

S_2 – стосується оточуючого середовища, що прилягає до нижньої сторони флютингу;

k – стосується номеру ітерації на кожному кроці інтегрування за часом;

$сух$ – стосується сухого термометра лабораторного гігрометра психрометричного;

$мок$ – стосується мокрого термометра лабораторного гігрометра психрометричного;

$ЕРС$ – стосується струму, що протікає через датчик теплового потоку;

вп – стосується водяної пари;

нагр – стосується періоду нагрівання процесу сушіння флютингу;

1п – стосується першого періоду процесу сушіння флютингу;

1кр – стосується кінця першого/ початок другого періодів сушіння

сц – стосується сушильного циліндра;

пг – стосується природного газу;

CO₂ – стосується вуглекислого газу.

Основні скорочення:

ІЧ – інфрачервоний;

ІЧВ – інфрачервоне випромінювання;

ЕІВ – енергія інфрачервоного випромінювання;

ЦПВ – целюлозно-паперове виробництво;

ПРМ – папероробна машина;

КРМ – картоноробна машина;

РКТ – радіаційно-кондуктивний теплообмін;

МСР – метод скінченних різниць;

ЕРС – електрорушійна сила;

ДСТУ – державний стандарт України;

ГОСТ – “государственный стандарт”;

ТУ – технічні умови;

кафедра МАХНВ – кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв;

ІХФ – інженерно-хімічний факультет;

КПІ ім. Ігоря Сікорського – Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського;

США – Сполучені Штати Америки;

ПТК – промислова торгівельна компанія;

ПАТ – публічне акціонерне товариство;

ПрАТ – приватне акціонерне товариство;

ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю;

ВАТ – відкрите акціонерне товариство;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ЕРС – електрорушійна сила.

ВСТУП

У зв'язку зі зростаючим обсягом виробництва та попитом на гофрокартон суттєво збільшується виробництво паперу для гофрування – флютингу.

Лімітуючою стадією у виробництві флютингу є процес сушіння на сушильних циліндрах папероробної машини (ПРМ). Цей спосіб має ряд недоліків: висока вартість обладнання, викиди продуктів згоряння при виробництві водяної пари для сушильних циліндрів, складність конструкції сушильного обладнання та його обслуговування, налипання клею на поверхні сушильних циліндрів після проклеювання флютингу.

Ці недоліки є підставою для дослідження альтернативних способів сушіння та розробки нових конструкцій сушильних установок, що забезпечують зменшення негативного впливу на довкілля шляхом зменшення утворення обсягів продуктів згоряння, здешевлення обладнання та зменшення енерговитрат.

Одним з перспективних способів сушіння є використання енергії інфрачервоного випромінювання (ІЧВ), що має здатність проникати в об'єм матеріалу (радіаційний спосіб сушіння). Флютинг швидко нагрівається від теплоти, що виділяється в його об'ємі під час проходження ІЧВ, зменшуючи час нагрівання.

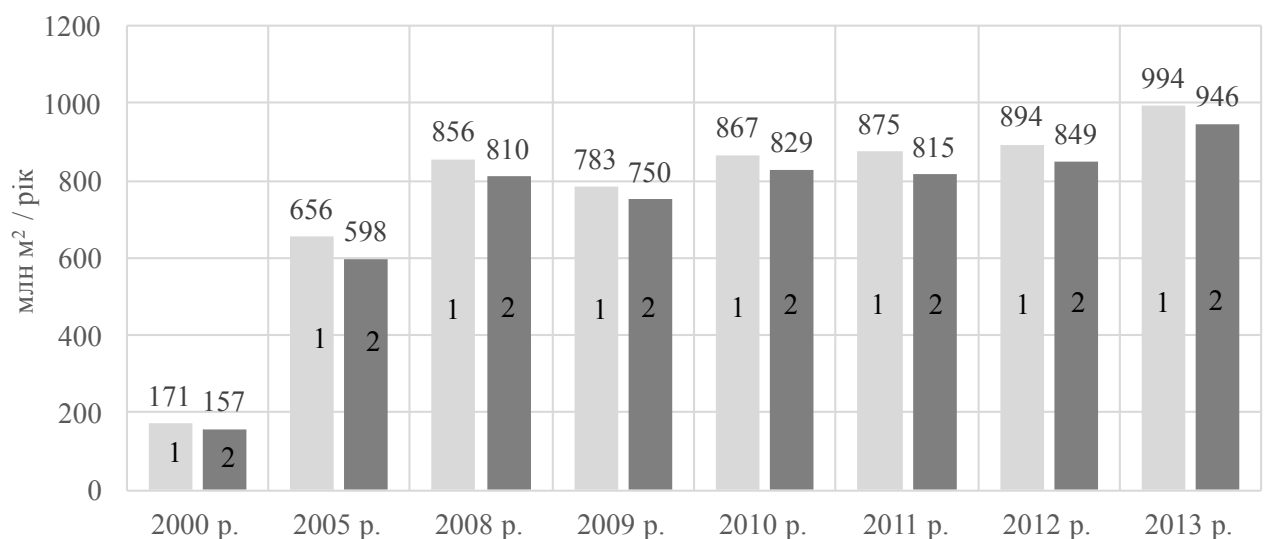
Розробка промислових установок сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ потребують знання кінетичних закономірностей цього процесу. Це вимагає дослідження кінетики процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ та розробки методики розрахунку параметрів процесу, необхідних для конструювання сушильного обладнання.

Тому розробка ефективного способу сушіння паперу, що зменшує негативний вплив на довкілля, є актуальною.

1 ПРОБЛЕМИ ТА ОСОБЛИВОСТІ СУШІННЯ ПАПЕРУ ДЛЯ ГОФРУВАННЯ (ФЛЮТИНГУ) ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕНЕРГІЇ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

1.1 Флютинг як складова гофрокартону

Гофрокартон є одним з найбільш поширених пакувальних матеріалів, темпи виробництва та споживання якого в Україні з 2000 по 2013 рік зросли майже в чотири рази (рисунок 1.1) [115].



1 – виробництво; 2 – споживання

Рисунок 1.1 – Виробництво та споживання гофрокартону в Україні

Найбільшими виробниками гофрокартону в Україні є ПАТ «Київський картонно-паперовий комбінат» (доля ринку в 2014 р. складала 25,5%), ПАТ «Рубіжанський картонно-тарний комбінат» та ТОВ «Трипільський пакувальний комбінат» (доля ринку в 2014 р. складала 22,4%); ТОВ «Основа Папір» (ВАТ «Жидачівський целюлозно-паперовий комбінат» і ПАТ «Ізмаїльський целюлозно-картонний комбінат», на 2014 р. належало більше 14% ринку). [116].

Зростання виробництва гофрокартону пов'язано, насамперед, з тим, що гофрокартон має ряд позитивних якостей [82]:

- високі механічні показники;

- низька питома маса та вартість тари з гофрокартону в порівнянні з іншими пакуваннями;
- легкість транспортування;
- легкість складування та надання необхідної форми;
- широкий ряд типорозмірів та конструкцій;
- рециклінг сировини;
- екологічність продукції (на відміну від інших типів пакування, наприклад, з розповсюдженого поліетилену [8]);
- легкість нанесення зображення;
- рентабельність виробництва.

Недоліки гофрокартону:

- непрозорість, що в деяких випадках може бути небажаною властивістю;
- невисокі в порівнянні з іншими типами пакуваннями показники вологостійкості [12].

Властивості гофрокартону зумовлюють сферу його застосування:

- пакувальний матеріал у вигляді ящиків, коробок, мішків;
- як теплоізоляційний матеріал;
- як будівельний матеріал;
- як звукоізоляційний матеріал;
- в якості фільтрувального матеріалу.

Згідно ГОСТ 7376-89 [67] гофрокартон буває двох- (тип “Д”), трьох- (тип “Т”) та п’ятишаровим (тип “П”). В залежності від технічних характеристик кожен тип поділяється на три класи (клас 1, 2 та 3)

Гофрокартон складається з таких основних елементів – плоских шарів (лайнера), паперу для гофрування (флутингу) та клею, що їх скріплює (рисунок 1.2). Відповідно ТУ підприємства кількість шарів у гофрокартоні може бути більшою (широко поширене виробництво семишарового гофрокартону).

Згідно ГОСТ 7376-89 існують різні марки гофрокартону (Д, Т11–Т15, Т21–Т27, П31–П37), які відрізняються показниками міцності, щільності, опором



1 – лайнер; 2 – флютинг

Рисунок 1.2 – Структура гофрокартону

продавлювання, торцевим стисненням, вологостійкістю та подовженням під час розтягуванні.

Основне навантаження тари з гофрокартону сприймає флютинг, тому від його механічних характеристик найбільше залежить міцність та жорсткість гофрокартону в цілому [116].

Згідно ДСТУ 7377-85 [70] флютинг виготовляється марок Б-0, Б-1, Б-2 та Б-3, відрізняючись фізико-механічними характеристиками. Маса квадратного метру флютингу в залежності від марки наведено в таблиці 1.1. Коливання маси квадратного метру по ширині рулону має не перевищувати 10% від середнього значення для всіх марок.

Таблиця 1.1 – Маса квадратного метру флютингу

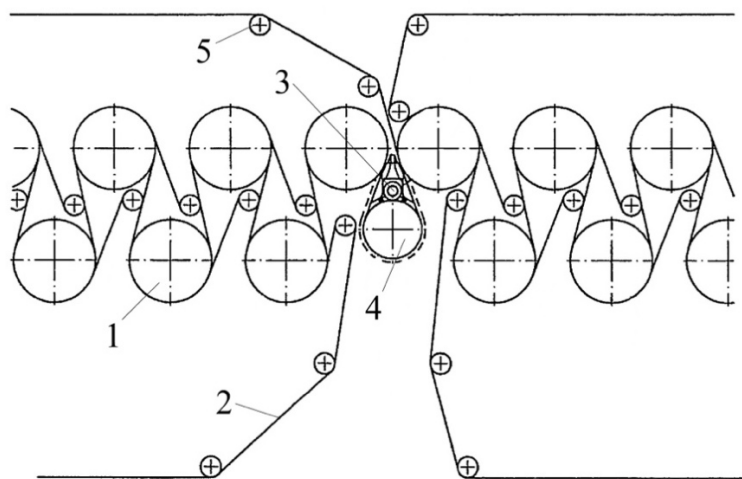
Марка флютингу	Б-0	Б-1	Б-2	Б-3
Маса квадратного метру, г/м ²	100±5,	100±5,	80±5,	100±5,
	112±6,	112±6,	112±6,	112±6,
	125±6,	125±6,	125±6,	125±6,
	140±8,	140±8,	140±8,	140±8,
	175±10	175±10	160±8	160±11

ДСТУ 7377-85 не регламентує тип сировини для виробництва флютингу. Основною сировиною для виробництва флютингу марок Б-0 і Б-1 є макулатурна маса і сульфатна невибілена хвойна целюлоза, для флютингу марок Б-2 і Б-3 сировина – макулатурна маса, що може містити незначну кількість включень [5].

1.2 Обладнання для сушіння флютингу

У виробництві флютингу та паперу в цілому одним з найбільш енергоємним процесом є сушіння [84, 119]. Тому постає питання необхідності інтенсифікації процесу сушіння зі зменшенням енерговитрат та металоємкості обладнання.

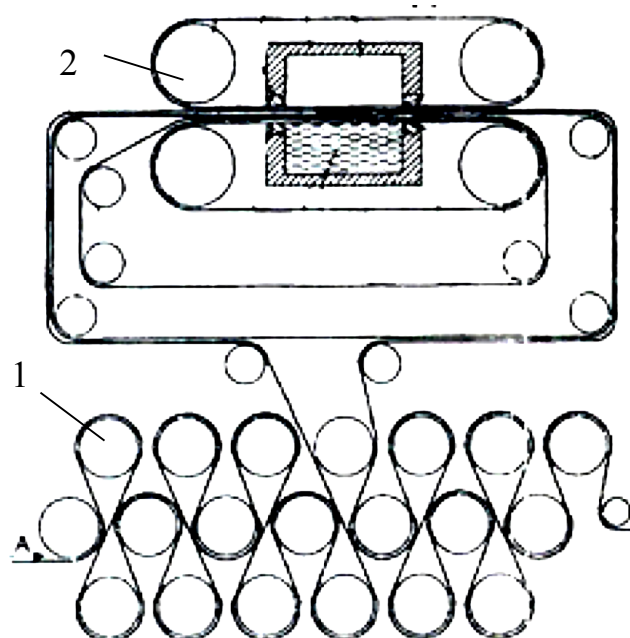
В целюлозно-паперовій промисловості для сушіння флютингу найбільшого розповсюдження отримали контактні сушильні установки, у яких теплота передається вологому полотну безпосередньо від нагрітої поверхні сушильних циліндрів, розташованих в шаховому порядку (рисунок 1.3) [84, 119]. Підвищення температури пари, за допомогою якого обігріваються сушильні циліндри, обмежене допустимим значенням тиску та економічною доцільністю [118]. Приклад такої конструкції наведено на рисунку 1.3 [40].



1 – сушильний циліндр; 2 – сукно/сітка; 3 – вакуумний ящик; 4 – вакуумний вал; 5 – сукно/сітка ведучий вал
Рисунок 1.3 – Дворядна сушильна частина

Недоліком таких конструкцій є наявність вільного пробігу паперового полотна між сушильними циліндрами, що збільшує вірогідність його обриву. Також необхідно відмітити високу вартість сушильних циліндрів та необхідність застосовувати водяну пару. Утворення водяної пари відбувається завдяки спалюванню природного газу, що негативно впливає на довкілля.

Для інтенсифікації сушіння паперового полотна сушильні циліндри монтують в три яруси і доповнюють іншими пристроями для зневоднення (рисунок 1.4) [36].

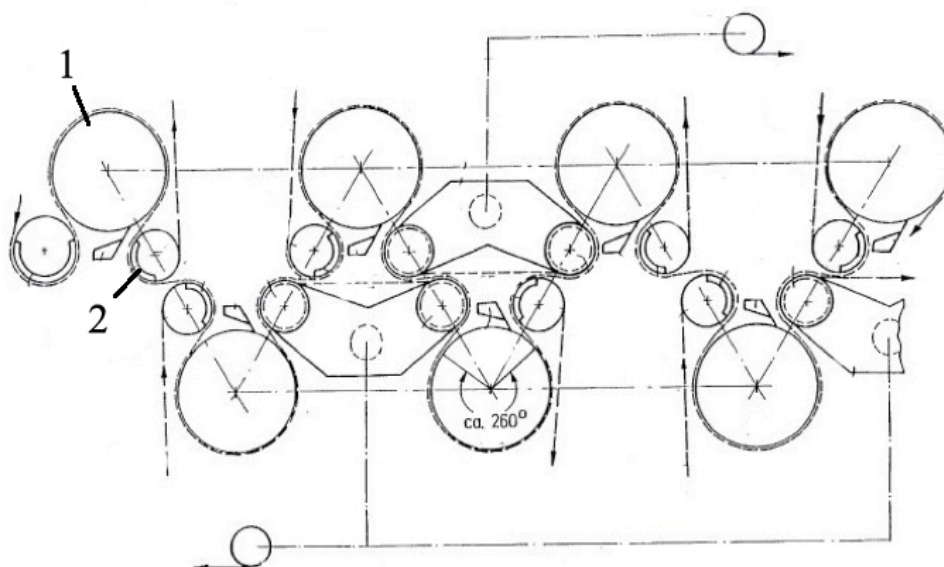


1 – сушильні циліндри; 2 – стрічкова сушарка

Рисунок 1.4 – Триярусна сушильна група

Недоліком такої конструкції є збільшена металоємність та складність обслуговування. Крім того погіршується відвід парогазової суміші над сушильними циліндрами, що зменшує інтенсивність сушіння.

Інша сушильна група [33], де для збільшення ступеня зневоднення встановлено додаткові пристрої, показана на рисунку 1.5.



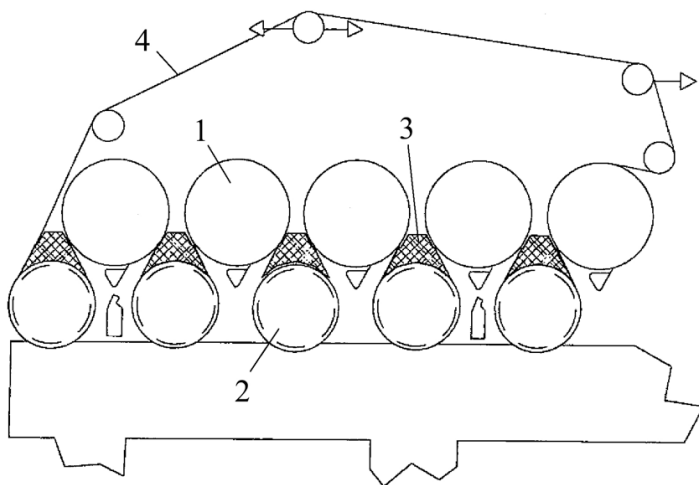
1 – сушильні циліндри; 2 – вакуумні вали

Рисунок 1.5 – Сушильна частина папероробної машини

Перевагою конструкції є зменшення довжини вільного пробігу паперового полотна та збільшення інтенсивності сушіння завдяки встановленню вакуумних валів.

Недоліками даної конструкції є підвищені енергозатрати на утворення вакууму, можливе маркування полотна паперу та ускладнення конструкції самої сушильної частини.

Для зменшення кількості обривів паперового полотна для усунення вільних пробігів в дворядній сушильній секції з двома незалежними сукнами нижні сушильні циліндри також заміняють на всмоктувальні (вакуумні) або продувні (рисунок 1.6) [37]. В такому випадку полотно рухається на одному сукні без вільних пробігів. Для кращого зневоднення паперового полотна, як правило в першій сушильній секції, можуть встановлюватись вакуумні або продувні ящики [58].

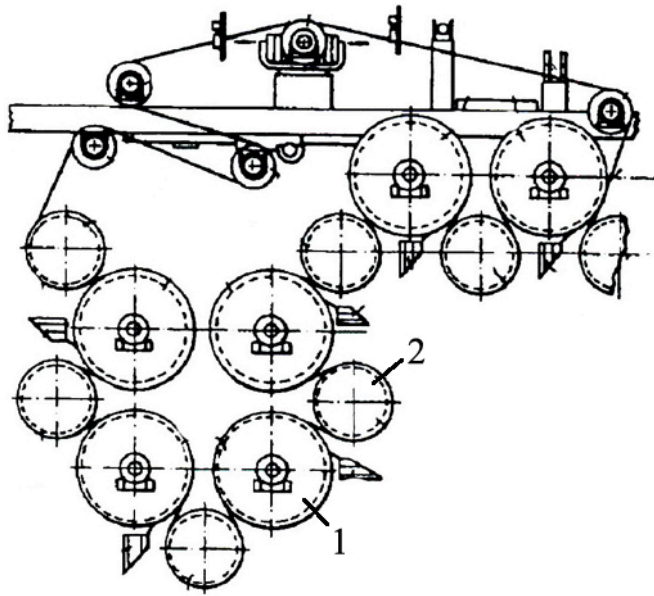


**1 – сушильний циліндр;
2 – вакуум-циліндр, 3 –
вакуумний або
продувний ящик; 4 –
сукно/сітка**

Рисунок 1.6 – Сушильна група з вакуумними циліндрами та ящиками

Недоліком конструкції є збільшені енерговитрати на утворення вакууму та одностороннє вигладжування паперового полотна. Крім того, інтенсивність зневоднення шляхом застосування вакууму в сушильній частині менша в порівнянні із застосуванням вакууму в сітковій частині ПРМ.

Інша конструкція сушильної групи з встановленими відсутніми вільними пробігами паперового полотна та встановленими вакуумними або продувними валами показана на рисунку 1.7 [24].



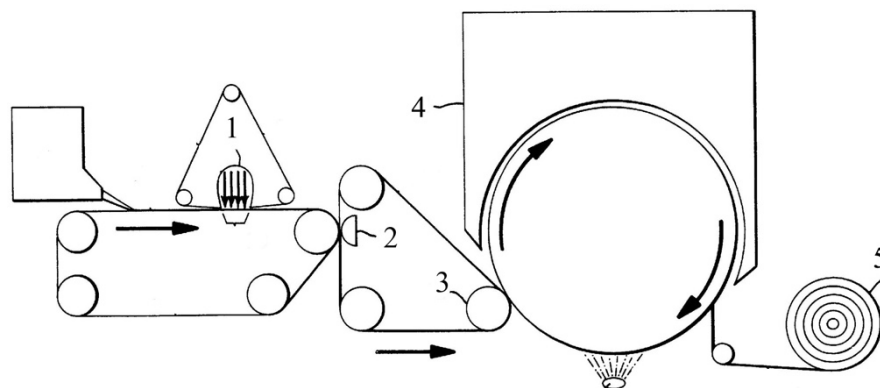
**1 – сушильний циліндр; 2 –
вакуумні або продувні вали**

**Рисунок 1.7 – Сушильна
група ПРМ**

Крім збільшеної металоємності та складності обслуговування недоліком такої конструкції є одностороннє вигладжування паперового полотна під час сушіння.

Перевагою цієї конструкції є відсутність вільних пробігів паперового полотна.

Для збільшення інтенсивності зневоднення паперу в зону сушіння подають газоподібний теплоносіє високої температури (нагріте повітря) (рисунок 1.8). Як правило, таке технічне рішення використовують при сушінні паперу з малою масою квадратного метру паперу на лощильному циліндрі [41].

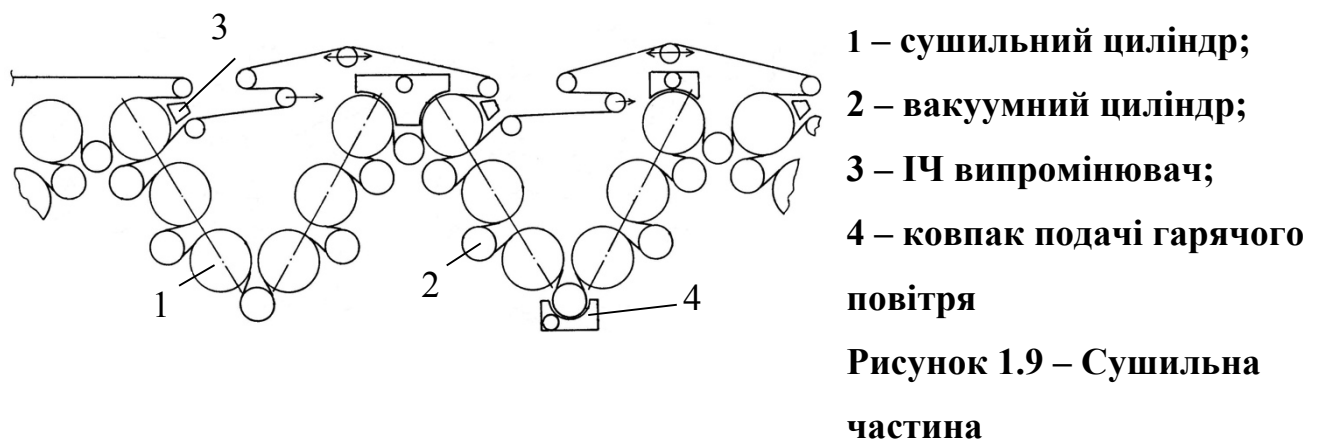


**1 – башмачний прес; 2 – перший пресовий захват; 3 – другий пресовий
захват; 4 – ковпак з лощильним циліндром; 5 – рулон паперу**

Рисунок 1.8 – ПРМ з лощильним циліндром

Недоліком конструкції є збільшення металоємності та габаритів установки для сушіння паперу та збільшені енерговитрати на нагрівання газоподібного теплоносія.

У виробництві часто використовують сушильні секції, що містять поєднання різних способів інтенсифікації сушіння паперу. Наприклад, на рисунку 1.9 зображено сушильну секцію [25], в котрій розміщені ковпаки для подачі газоподібного теплоносія високої температури (нагрітого повітря), інфрачервоні випромінювачі та вакуумні циліндри.

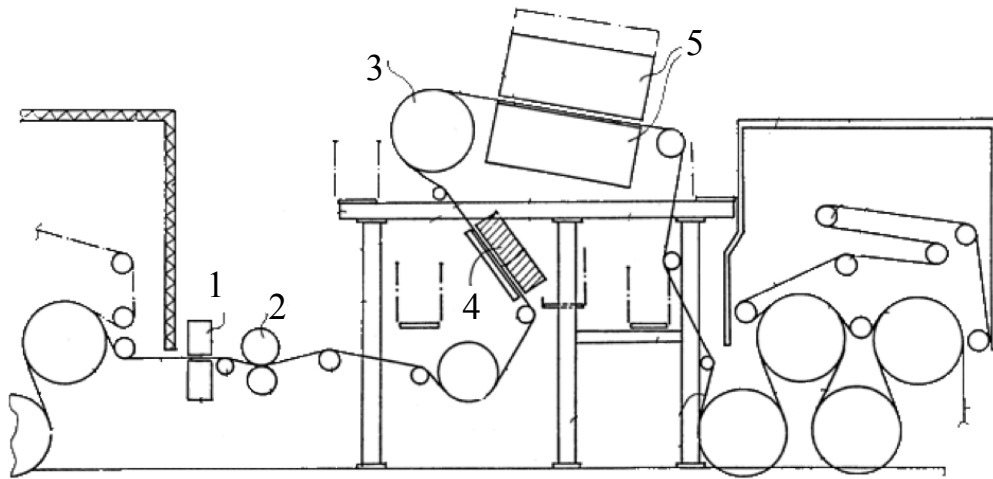


В цій конструкції паперове полотно постійно контактує з сукном чи сіткою, що запобігає обриву полотна.

В сушильній секції (рисунок 1.9) над паперовим полотном, що прилягає до гарячої поверхні сушильного циліндру, розміщені ІЧ випромінювачі. Це дозволяє збільшити тепловий потік в паперовому полотні, що зменшує загальний час сушіння.

Така конструкція має великі габарити зі збільшеною металоємністю та енерговитратами.

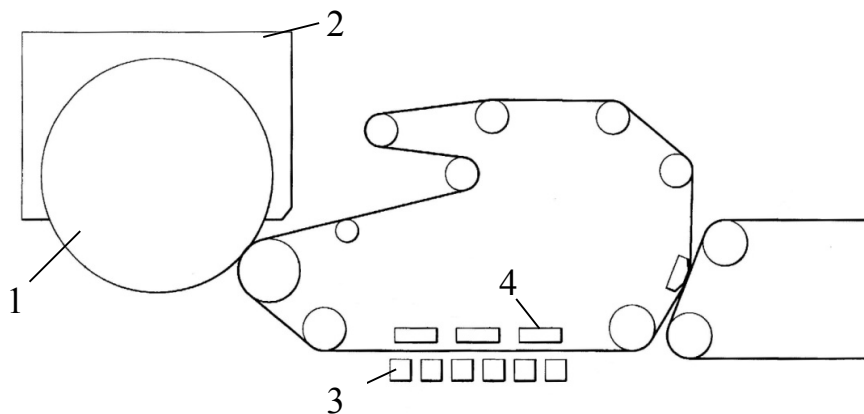
Збільшення продуктивності існуючих ПРМ часто обмежується неможливістю зростання переданої паперу кількості теплоти. Встановлення додаткових джерел енергії на вільних місцях дозволяє збільшити кількість переданої паперу теплоти і, відповідно, продуктивності ПРМ. Одне з таких технічних рішень [34] показано на рисунку 1.10.



1 – ІЧ випромінювач; 2 – прес; 3 – сушильний циліндр; 4 – ІЧ випромінювач, 5 – конвективний нагрівач

Рисунок 1.10 – Метод сушіння паперового полотна з використанням інфрачервоного випромінювання

Застосування гарячого повітря та ІЧ випромінювання для збільшення інтенсивності сушіння широко розповсюджене в закордонних машинах і в інших конструкціях (рисунок 1.11) [32].



1 – лоцильний циліндр; 2 – ковпак подачі гарячого повітря; 3 – ІЧ випромінювачі; 4 – вакуумні ящики

Рисунок 1.11 – Сушильна частина ПРМ

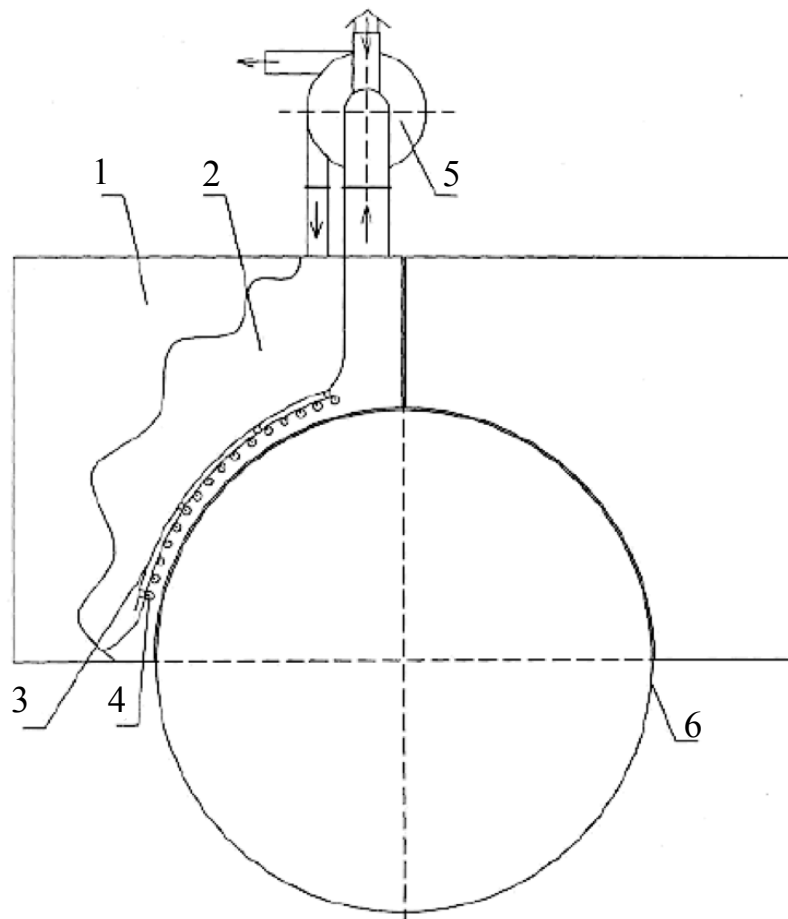
В сушильній частині ПРМ, що представлена на рисунку 1.11, встановлення ІЧ випромінювачів та вакуум-ящиків дозволило модернізувати існуючу ПРМ, збільшивши інтенсивність сушіння паперу. Це дозволило збільшити швидкість паперового полотна і, відповідно, продуктивність ПРМ. Зростання кількості

наданої паперу теплоти дає змогу сушити полотно з більшою масою квадратного метру.

Гаряче повітря, що подається в ковпак над лощильним циліндром, під час транспортування в газопроводах втрачає деяку кількість теплоти.

Існує технічне рішення [106], згідно якого в ковпаку над лощильним циліндром розміщені ІЧ випромінювачі (рисунок 1.12). Вони створюють тепловий потік, що інтенсифікує процес сушіння паперу.

Газоподібний теплоносій (повітря), що подається в ковпак, проходить над робочою та зворотною поверхнями ІЧ випромінювачів та нагрівається від них. Таким чином зменшуються теплові втрати під час транспортування теплоносія. А проходження його над зворотною поверхнею ІЧ випромінювачів збільшує коефіцієнт використання їх теплової енергії.

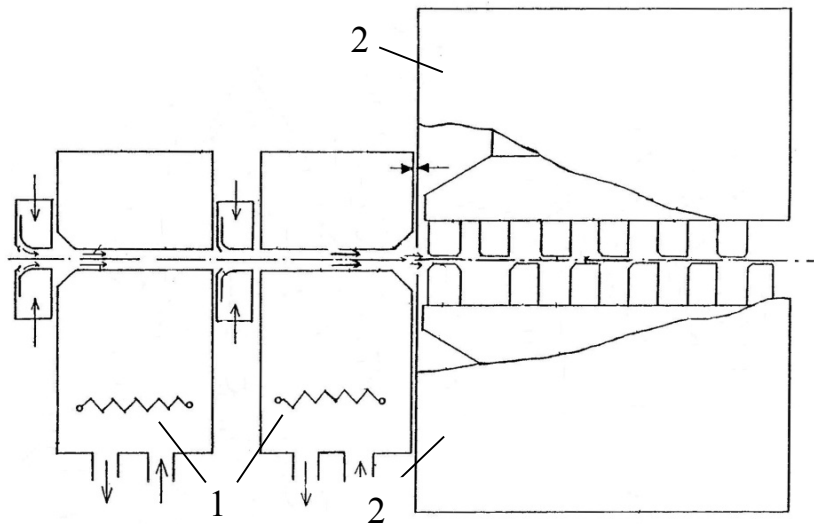


1 – корпус ковпака; 2 – порожнина ковпака; 3 – рефлектор; 4 – ІЧ випромінювачі; 5 – вентилятор; 6 – лощильний циліндр

Рисунок 1.12 – Ковпак швидкісного сушіння

До недоліків конструкції можна віднести підвищені витрати електроенергії на роботу вентилятора, який зумовлює циркуляцію повітря в зоні сушіння.

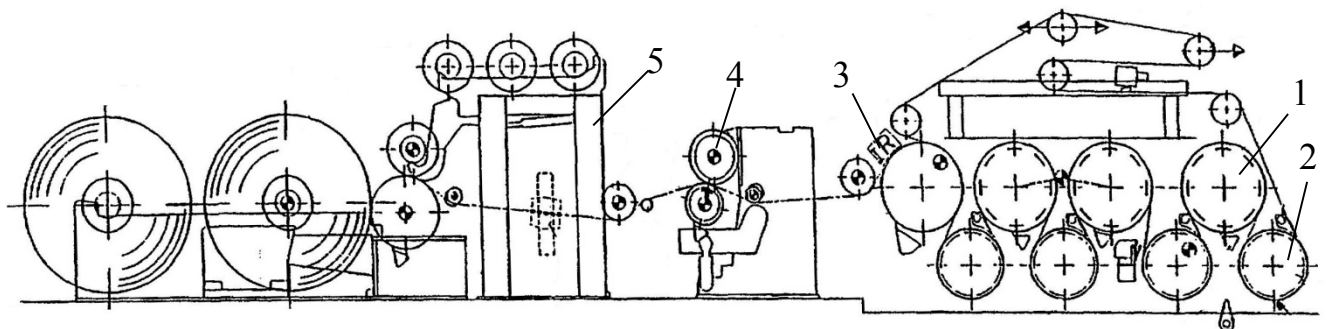
В пристрою для сушіння паперу чи іншого волокнистого матеріалу (рисунок 1.13) поєднується сушіння із застосуванням енергії ІЧВ та газоподібний теплоносії (гаряче повітря) [27, 28]. Для зменшення енерговитрат теплоносії нагрівається під час проходження над гарячою поверхнею ІЧ випромінювачів.



1 – блоки ІЧ випромінювачів з системою циркуляції повітря; 2 – блоки подачі гарячого повітря
Рисунок 1.13 – Пристрій для сушіння паперу

Інфрачервоні випромінювачі також використовуються в кінці сушильної частини для регулювання кінцевої сухості паперового чи картонного полотна.

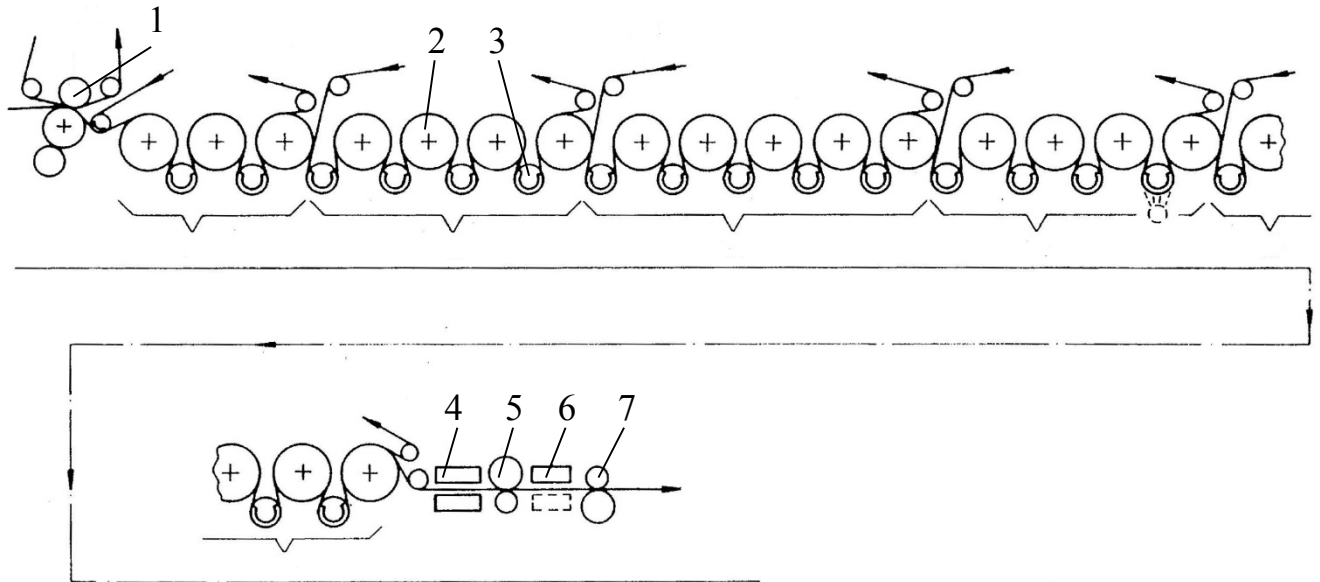
Конструкція ПРМ з установкою ІЧ випромінювачів над поверхнею паперу біля останнього сушильного циліндру показана на рисунку 1.14 [39].



1 – сушильний циліндр; 2 – вакуумний циліндр; 3 – ІЧ випромінювач; 4 – каландр; 5 – накат

Рисунок 1.14 – Кінець папероробної машини

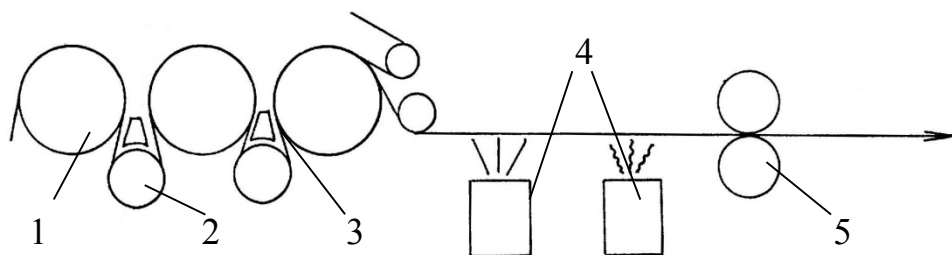
Конструкція ПРМ з установкою ІЧ випромінювачів над обома поверхнями паперу в кінці сушильної частини показана на рисунку 1.15 [31].



1 – прес; 2 – сушильний циліндр; 3 – вакуумні або продувні циліндри;
4, 6 – ІЧ випромінювачі; 5, 7 – каландри

Рисунок 1.15 – Сушильна та оздоблювальна частина папероробної машина

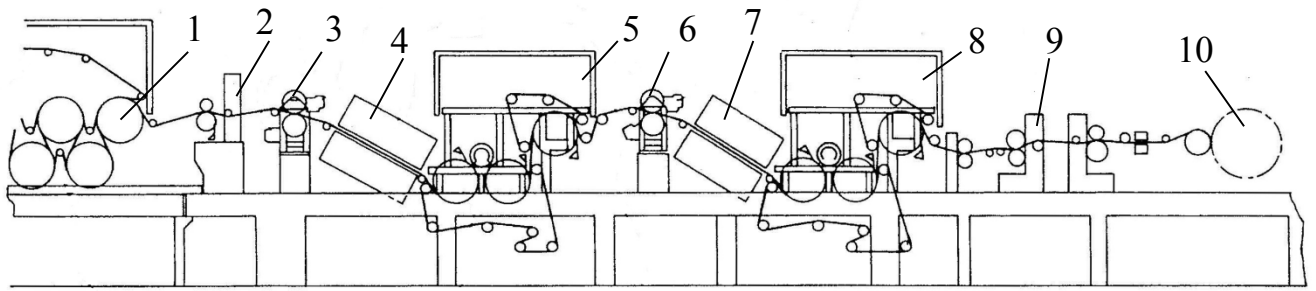
Конструкція ПРМ з установкою ІЧ випромінювачів над нижньою поверхнею паперу в кінці сушильної частини показана на рисунку 1.16 [35].



1 – сушильний циліндр; 2 – вакуумні циліндри; 3 – вакуумні ящики; 4 –
ІЧ випромінювачі (або конвективні нагрівачі); 5 – гарячі циліндри

Рисунок 1.16 – Пристрій для регулювання кінцевої сухості паперу

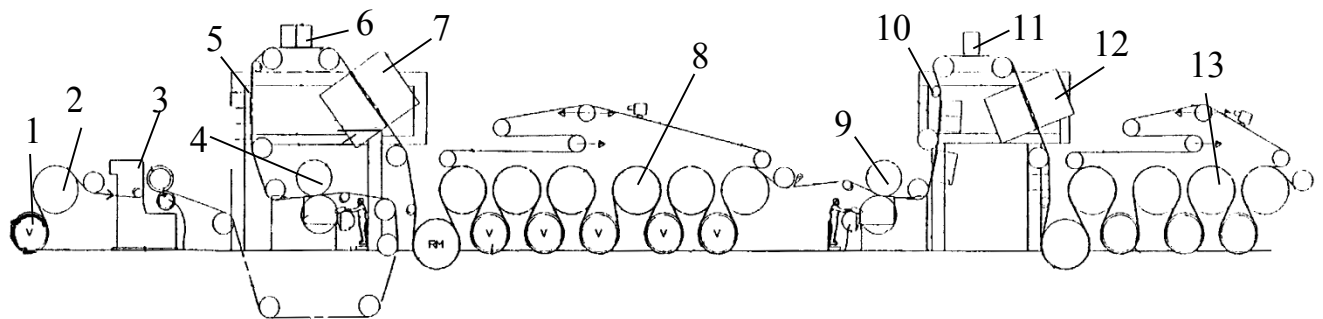
Сушильні пристрої з ІЧ випромінювачами безконтактної дії. Тому ІЧВ широко розповсюджене в сушильних частинах після пристроїв для нанесення покриття на паперове полотно (рисунки 1.17-1.19) [30]. Інші подібні конструкції в працях [38, 42].



1 – сушильні циліндри; 2 – офсетний прес; 3, 6 – клеїльний прес; 4, 7 – ІЧ випромінювач; 5, 8 – сушильні циліндри (однорядні); 9 – каландр; 10 – накат

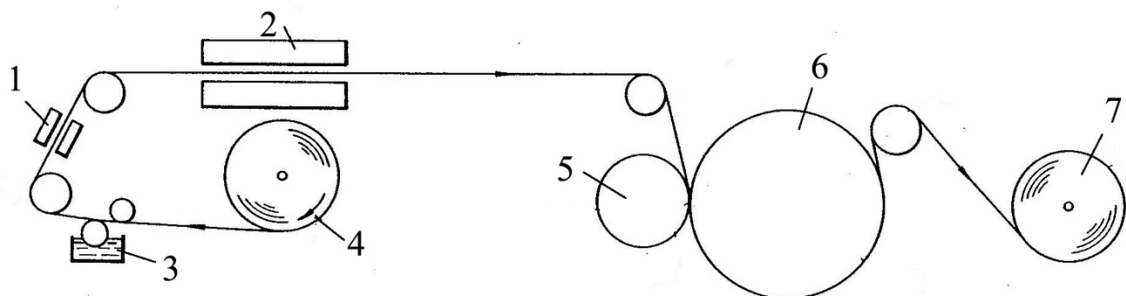
Рисунок 1.17 – Оздоблювально-сушильна частина ПРМ

Для збільшення інтенсивності висихання клею після ІЧ випромінювачів може застосовуватись подача газоподібного теплоносія (рисунок 1.18 та 1.19) [26, 34].



1, 2 – вакуумний та сушильний циліндр; 3 – каландр; 4, 9 – клеїльний прес; 5, 6, 10, 11 – ІЧВ; 7, 12 – подача гарячого повітря; 8, 13 – сушильна група

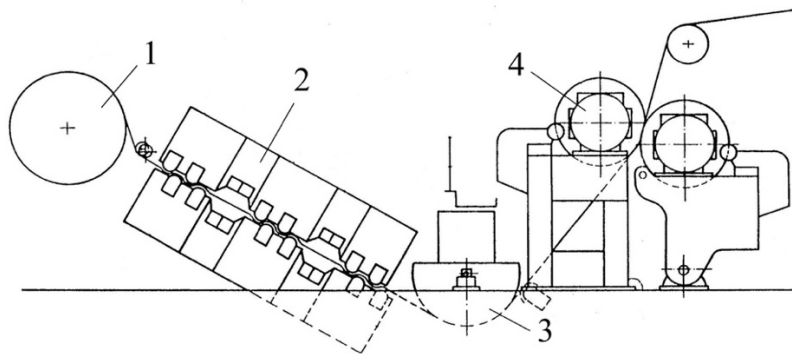
Рисунок 1.18 – Сушильна частина ПРМ з пристроями для нанесення покриття



1 – ІЧВ; 2 – пристрій конвективного сушіння; 3 – пристрій для нанесення покриття; 4 – розкат; 5 – пресовий вал; 6 – циліндр; 7 – накат

Рисунок 1.19 — Метод виробництва паперу з нанесенням покриття

Також для збільшення інтенсивності підсушування поверхні паперу з нанесеним покриттям ІЧВ комбінують одночасною взаємодією з газовим теплоносієм (рисунок 1.20) [29].



**1 – сушильний циліндр;
2 – безконтактна
проводка повітрям;
3 – ІЧ випромінювачі;
4 – клеїльний прес**
**Рисунок 1.20 – Пристрій
сушіння паперу після
клеїльного пресу**

Найбільш поширені сушильні частини ПРМ складаються з двоярусного розміщення сушильних циліндрів. Проте вони мають ряд недоліків [85, 87, 88, 98]. Існують конструкції сушильних груп з нестандартним розташуванням сушильних циліндрів та використанням вакууму чи нагрітого газоподібного теплоносія. Такі конструкції мають наступні недоліки: збільшена металоємність та енерговитрати, одностороннє та недостатнє вигладжування паперового полотна, затрати на створення вакууму або нагрівання теплоносія. Для інтенсифікації сушіння паперу в сушильних частинах ПРМ за кордоном розповсюджено встановлення ІЧ випромінювачів. Компактність пристроїв з ІЧ випромінювачами дозволяє їх монтувати на існуючі ПРМ, збільшуючи інтенсивність сушіння. Це дозволить збільшити продуктивність ПРМ або зменшити кількість сушильних циліндрів. Також ІЧ випромінювачі широко застосовують для сушіння клею на папері після клеїльного пресу.

Необхідно відмітити, що за кордоном широко застосовують радіаційний спосіб сушіння паперу в поєднанні з кондуктивним. Наприклад в Канаді 27 % ПРМ обладнані пристроями з ІЧ випромінювачами [52].

Аналіз використання ІЧ випромінювачів в целюлозно-паперовій промисловості дозволяє стверджувати, що дослідження процесу сушіння із застосуванням ІЧВ для сушіння флютингу є актуальним.

1.3 Моделювання процесу сушіння флютингу

Загальне рівняння теплового балансу флютингу, що описує процес сушіння, записується як:

$$Q_{\text{ІЧ}} = Q_{\text{в}} + Q_{\text{фл}} + Q_{\text{вип}} + Q_{\text{втр}} \quad (1.1)$$

де $Q_{\text{ІЧ}}$ – кількість теплоти, що підводиться до флютину, Дж; $Q_{\text{в}}, Q_{\text{фл}}$ – кількість теплоти, що поглинається вологою та абсолютно сухою частиною флютингу, Дж; $Q_{\text{вип}}$ – кількість теплоти, що витрачається на випаровування води, Дж; $Q_{\text{втр}}$ – втрати теплоти поверхнею флютингу, Дж.

Згідно [84] система диференціальних рівнянь, що описує дифузійно-фільтраційний волого- і теплопереніс у вологих матеріалах в будь-яких умовах має вигляд:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = k_{11} \nabla^2 u + k_{12} \nabla^2 T + k_{13} \nabla^2 P \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = k_{21} \nabla^2 u + k_{22} \nabla^2 T + k_{23} \nabla^2 P \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = k_{31} \nabla^2 u + k_{32} \nabla^2 T + k_{33} \nabla^2 P, \quad (1.4)$$

де $\frac{\partial u}{\partial \tau}$ – зміна вологовмісту за одиницю час, кг/(кг·с); $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ – зміна температури за одиницю часу, К/с; $\frac{\partial P}{\partial \tau}$ – зміна тиску за одиницю час, Па/с; k_{ij} ($ij = 1, 2, 3$) – коефіцієнти пропорційності.

Для капілярно-пористих тіл коефіцієнти пропорційності переносу води у вигляді пари та рідини визначаються [84]:

$$k_{11} = a_m, \quad k_{12} = a_m^T = a_m \delta_T, \quad k_{13} = \frac{k_p}{\rho_0} \quad (1.5)$$

$$k_{21} = \frac{r\varepsilon}{c} a_m, \quad k_{22} = a + \frac{r\varepsilon}{c} a_m \delta, \quad k_{23} = \varepsilon r \frac{a_m}{c} \delta_p \quad (1.6)$$

$$k_{31} = -\frac{\varepsilon a_m}{c_p}, \quad k_{32} = -\frac{\varepsilon a_m}{c_p} \delta, \quad k_{33} = a_p - \frac{\varepsilon a_m}{c_p} \delta_p, \quad (1.7)$$

де a_m – коефіцієнт дифузії вологи, $\text{м}^2/\text{с}$; a_m^T – коефіцієнт термодифузії вологи, $\text{м}^2/\text{К}\cdot\text{с}$; δ_T – термоградієнтний коефіцієнт переносу вологи, К^{-1} ; k_p – коефіцієнт фільтраційного переносу вологи $\text{м}^2/(\text{К}\cdot\text{с})$; ρ_0 – густина скелета сухого матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$; δ_p – відносний коефіцієнт фільтраційного потоку вологи; a_p – коефіцієнт конвективної фільтраційної дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$; c_p – теплоємність вологого повітря в пористому тілі, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$; ε – критерій чи коефіцієнт фазового перетворення рідини в пар; r – теплота пароутворення, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Ця система справедлива для будь-якого виду волого- і теплопереносу, але за умови сталості коефіцієнтів волого- і теплопереносу.

За умови відсутності градієнту загального тиску ($\nabla P = 0$) або коли він незначний процес сушіння може бути описаний наступною системою рівнянь:

$$c\rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \varepsilon r \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_m \frac{\partial u}{\partial x} + a_m \delta_T \frac{\partial t}{\partial x} \right), \quad (1.9)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Оскільки

$$a_m = \frac{\lambda}{c\rho_0}. \quad (1.10)$$

Диференціальне рівняння (1.8) матиме вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_m \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\varepsilon r}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (1.11)$$

За сушіння радіаційним способом диференціальні рівняння необхідно доповнити джерелом внутрішньої енергії (теплоти, що виділяється внаслідок

проходження через матеріал ІЧ випромінювання).

$$c\rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \varepsilon r \rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} + Q_v, \quad (1.12)$$

де Q_v – об’ємний тепловий потік від поглиненого випромінювання, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$.

Граничні умови:

$$\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_\Pi = q_\Pi(\tau) - r(1 - \varepsilon)j_\Pi(\tau) \quad (1.13)$$

$$-a_m \rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_\Pi = a_m \rho_0 \delta \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_\Pi + j_\Pi(\tau) \quad (1.14)$$

де $q_\Pi(\tau)$ – інтенсивність теплообміну чи питомий потік тепла на поверхні, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $j_\Pi(\tau)$ – інтенсивність вологообміну чи питомий потік вологи з поверхні, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Для визначення потоку вологи з середини матеріалу до поверхні:

$$j_w = a_m \rho_0 \nabla u - a_m^T \rho_0 \nabla T - k_p \nabla p \quad (1.15)$$

де j_w – потік вологи всередині матеріалу, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

За малого значення термоградієнта всередині матеріалу коефіцієнт термодифузії вологи в порівнянні з коефіцієнтом дифузії вологи незначний. Тоді рівняння (1.9) спроститься

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (1.16)$$

А рівняння (1.15) набуде вигляду:

$$j_w = a_m \rho_0 \nabla u \quad (1.17)$$

Рівняння (1.17) та (1.16) дають змогу з деякими припущеннями описати потік вологи з внутрішніх шарів флутингу до поверхонь та швидкість сушіння завдяки зміні концентрації вологи.

Складність розв'язку таких рівнянь пов'язана з відсутністю всіх необхідних коефіцієнтів для сушіння флютингу.

Флютинг як капілярно-пористе колоїдне тіло під час сушіння має три періоди сушіння: періоди нагрівання, постійної швидкості та період швидкості, що спадає.

Встановлено, що під час сушінні капілярно-пористих колоїдних тіл, включно й паперу, в періоді спадної швидкості спостерігається поступове заглиблення зони випаровування вглиб матеріалу [15, 55, 120]. Це може змінити механізм переносу вологи зсередини паперу до поверхонь.

Для врахування цього явища об'ємну густину джерела теплоти в результаті випаровування та транспорту вологи з флютингу необхідно доповнювати величиною ε [84]:

$$q_{vi} = \varepsilon(u)\rho_{2f}(T)r\frac{du}{d\tau} \quad (1.18)$$

де ε – коефіцієнт фазового перетворення рідини в пар.

Коефіцієнт фазового перетворення ε змінюється від 0 (зміна вологовмісту відбувається завдяки переміщенню рідкої фази до поверхні випаровування) до 1 (зміна вологовмісту відбувається завдяки переміщенню пари). Складність викликає визначення коефіцієнту, що змінюється під час сушіння флютингу.

Волога з флютингу переходить в навколишнє середовище через пограничний шар на поверхнях паперу.

Інтенсивність сушіння флютингу може лімітуватись дифузією вологи зсередини до його поверхонь, швидкістю випаровуванням на поверхнях чи прилеглих до них шарах флютингу, або інтенсивністю переміщенням пари через пограничний шар в навколишнє середовище. В двох останніх випадках механізм переносу вологи всередині флютингу математично можна не описувати, вважаючи що дифузія вологи зсередини флютингу до поверхонь не лімітує процес сушіння.

Потік вологи з поверхонь матеріалу в навколишнє середовище без врахування термоградієнту та перепаду тиску по товщині флютингу описується рівнянням [84]:

$$j_{\text{п}} = a_m \rho_0 \nabla u - a_m^T \rho_0 \nabla T - k_p \nabla p = \beta_{\mu} (\mu_{\text{п}} - \mu_{\text{нс}}) \quad (1.19)$$

де $j_{\text{п}}$ – потік вологи з поверхні матеріалу назовні, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$; β_{μ} – коефіцієнт вологообміну, $\text{моль} \cdot \text{с}/(\text{м}^4 \cdot \text{Дж})$; $\mu_{\text{п}}, \mu_{\text{нс}}$ – хімічні потенціали на поверхні та в навколишньому середовищі відповідно, Дж/моль .

При ізотермічних умовах різницю хімічних потенціалів можна замінити на різницю відповідних парціальних тисків [84]. Тоді потік вологи з поверхні у навколишнє середовище запишеться:

$$j_{\text{п}} = \beta (p_{\text{п}} - p_{\text{пнс}}) \quad (1.20)$$

де β_{μ} – коефіцієнт вологообміну, с/м ; $p_{\text{п}}$ – тиск пари в пограничному шарі, Па; $p_{\text{пнс}}$ – парціальний тиск пари в навколишньому середовищі, Па.

Знаючи відносну вологість оточуючого навколо матеріалу середовища, парціальний тиск пари можна виразити як:

$$p_{\text{пнс}} = \varphi p_{\text{п}} \quad (1.21)$$

де φ – відносна вологість повітря в оточуючому навколо матеріалу середовищі.

Рівняння (1.21) відоме як закон Дальтона і справедливе лише для періоду постійної швидкості, коли температура капілярно-пористого матеріалу залишається постійною.

Для цього періоду швидкість сушіння також може бути визначена як:

$$\frac{du}{d\tau} = N = \frac{\beta (p_{\text{п}} - p_{\text{пнс}})}{\rho_0 R_v} \quad (1.22)$$

де N – швидкість сушіння в періоді постійної швидкості сушіння, $\text{кг}/(\text{кг} \cdot \text{с})$; R_v – відношення об'єму тіла до його поверхні, м.

Для періоду сушіння спадної швидкості можна застосувати формулу, що спрощено описує вологообмін тіла з навколишнім середовищем [84]:

$$j_{\text{п}} = \beta_2 \rho_0 (u_f - u_p) \quad (1.23)$$

де β_2 – коефіцієнт вологообміну в другому періоді (спадної швидкості), м/с; u_f, u_p – поточний та рівноважний вологовміст флютингу, кг/кг.

Значення поверхневого потоку вологи виражають через швидкість сушіння:

$$j_{\text{п}} = g_f \frac{du}{d\tau} \quad (1.24)$$

де g_f – маса квадратного метру сухого флютингу, кг/м².

З врахуванням рівняння (1.24) швидкість сушіння в першому періоді за рівнянням (1.23) набуде такого вигляду:

$$\frac{du}{d\tau} = \frac{\beta}{g_f} (p_{\text{п}} - p_{\text{нс}}) \quad (1.25)$$

Швидкість сушіння в другому періоді:

$$\frac{du}{d\tau} = \frac{\beta_2}{g_f} \rho_0 (u_i - u_p) \quad (1.26)$$

Виразивши

$$k = \frac{\beta_2}{g_f} \rho_0 \quad (1.27)$$

де k – коефіцієнт сушіння в другому періоді сушіння, с⁻¹.

Тоді рівняння (1.26) набуде вигляду

$$\frac{du}{d\tau} = k (u_f - u_p) \quad (1.28)$$

$$\frac{du}{d\tau} = -k_{\text{пр}}u - k_{\text{пр}}u_0 = -k_{\text{пр}}(u - u_0) \quad (1.32)$$

Проінтегрувавши за вологовмістом та часом рівняння (1.32), перепишемо у вигляді:

$$\ln \frac{u - u_0}{u_1 - u_0} = -k_{\text{пр}}\tau \quad (1.33)$$

Для першого періоду сушіння швидкість сушіння стала. З трикутника Дабв (рисунок 1.22):

$$N = \tan \alpha_{\text{п1пер}} = \frac{u_1 - u_{1\text{кр}}}{\tau_{1\text{кр}} - \tau_1} \quad (1.34)$$

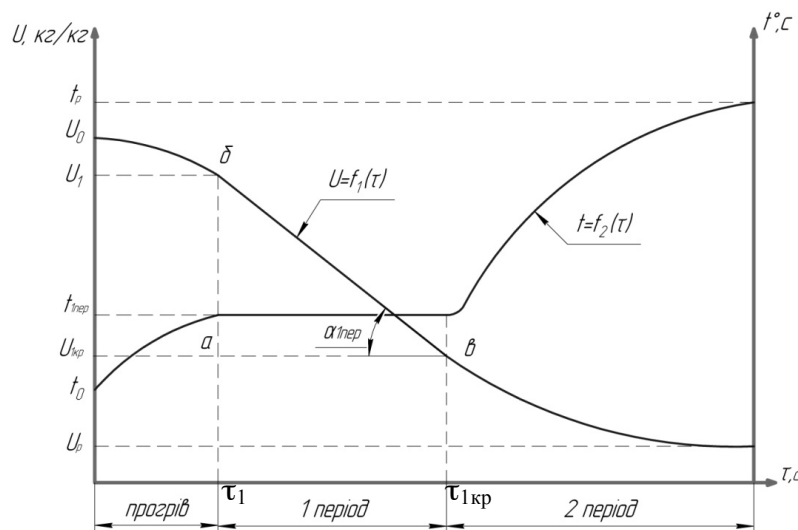


Рисунок 1.22 – Залежність вологовмісту та температури від часу сушіння

З рисунку 1.21 рівняння прямої $u_p a$ характеризує швидкість сушіння в другому періоді сушіння. Спрощено воно має такий вигляд:

$$\frac{du}{d\tau} = k_{2\text{пер}}u - b_{2\text{пер}} \quad (1.35)$$

де $k_{2\text{пер}}$ – тангенс кута нахилу відрізка au_p (згідно рисунка 1.21); $b_{2\text{пер}}$ – значення по осі ординат ($du/d\tau$), що відсікає відрізок au_p .

Враховуючи, що:

$$k_{2\text{пер}} = \tan \alpha_{2\text{пер}} = \frac{N}{u_{1к} - u_p} \quad (1.36)$$

А $b_{2\text{пер}}$:

$$b_{2\text{пер}} = u_p \cdot \tan \alpha_{2\text{пер}} = u_p k_{2\text{пер}} \quad (1.37)$$

Перепишемо рівняння швидкості сушіння в другому періоді сушіння:

$$-\frac{du}{d\tau} = k_{2\text{пер}}u - k_{2\text{пер}}u_p = k_{2\text{пер}}(u - u_p) \quad (1.38)$$

Знак мінус вказує, що швидкість зменшується.

Проінтегрувавши за вологовмістом та часом рівняння (1.36), перепишемо у вигляді:

$$-\ln \frac{u - u_p}{u_{1к} - u_p} = k_{2\text{пер}}\tau \quad (1.39)$$

З розв'язків рівнянь швидкостей (1.33), (1.34) та (1.39) можна отримати рівняння для знаходження часу сушіння в кожному з періодів.

Час сушіння періоду нагрівання, першого та другого періодів становить:

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{\ln \frac{u - u_0}{u_1 - u_0}}{-k_{\text{пр}}} \quad (1.40)$$

$$\tau_1 = \frac{u_1 - u_{1кр}}{N} \quad (1.41)$$

$$\tau_2 = \frac{-\ln \frac{u - u_p}{u_{1кр} - u_p}}{k_{2\text{пер}}} \quad (1.42)$$

Загальний час сушіння :

$$\tau_{\text{суш}} = \tau_{\text{пр}} + \tau_1 + \tau_2 = \frac{-\ln \frac{u-u_0}{u-u_p}}{k_{\text{пр}}} + \frac{u_1 - u_{1\text{кр}}}{N} + \frac{-\ln \frac{u-u_p}{u-u_p}}{k_{2\text{пер}}} \quad (1.43)$$

Недоліком такої методики для визначення швидкості сушіння флютингу є необхідність мати графічні залежності швидкості від вологовмісту. Ці залежності можуть різнитись від багатьох факторів: густини теплового потоку, маси квадратного метру тощо. Також результати розрахунку швидкості сушіння залежать від точності апроксимації експериментальних даних.

Важливим параметром сушіння є густина теплового потоку. Величину променевого потоку від ІЧ випромінювача до матеріалу описують рівнянням Стефана-Больцмана [84]:

$$q_{IR} = \varepsilon_{\text{п}} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (1.44)$$

де $\varepsilon_{\text{п}}$ – ефективна ступінь чорноти тіл для плоских поверхонь, розділених променевопрозорим середовищем; $c_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ – стала Стефана-Больцмана; T_1 , T_2 – абсолютні температури поверхонь випромінювання та нагрівального тіла, К.

Ефективна ступінь чорноти тіл [84]:

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (1.45)$$

де ε_1 , ε_2 – ступінь чорноти ІЧ випромінювача та матеріалу, що сушиться.

Тепловий потік, що дійшов до поверхні тіла, що нагрівається, не дорівнює загальному тепловому потоку випромінювача і становить:

$$q_{IR \text{ еф}} = \bar{\varphi} q_{IR}, \quad (1.46)$$

де $\bar{\varphi}$ – геометричний фактор, що залежить від відстані між поверхнями випромінювача та тіла [108]. Знайти геометричний фактор можна з графічної залежності, що показана на рисунку 1.23.

Криві 1-8 на рисунку 1.23 вибираються в залежності від умов випромінювання та геометричних властивостей тіла, що поглинає ІЧ випромінювання.

Величина K_l визначається зі співвідношення:

$$K_l = \frac{a}{b} \quad (1.47)$$

де a – довжина меншої сторони нагріваемого тіла чи його діаметр, м; b – відстань від поверхні випромінювання до поверхні нагрівального тіла, м.

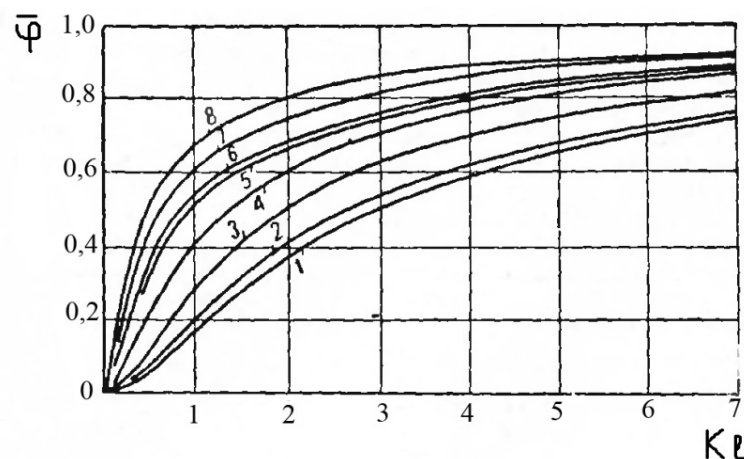


Рисунок 1.23 – Графічна залежність визначення геометричного фактору

Розподіл теплового потоку від ІЧВ по товщині матеріалу, що сушиться, визначається шляхом розрахунку методом сальдо, зональним розрахунком тощо [76, 101]. Проте ці методи потребують знання багатьох факторів.

Розподіл теплового потоку по товщині матеріалу, враховуючи флютинг, також можна визначити за законом Бугера [15, 53, 56]:

$$q_{IR_{\text{еф}}} = q_{IR} e^{-\int_0^x a \cdot dx} \quad (1.48)$$

де a – ефективний коефіцієнт адсорбції вологого флютингу, 1/м; dx – елементарний шар по товщині флютингу.

Коефіцієнт поглинання ІЧВ водою та волокном за законом адитивності:

$$a = a_f S + a_w w, 1/\text{м} \quad (1.49)$$

де a_f – коефіцієнт поглинання ІЧВ волокном флютингу, $1/\text{м}$; a_w – коефіцієнт поглинання ІЧВ водою, $1/\text{м}$.

Цей метод є більш простим в обрахунку, проте потребує експериментального підтвердження.

1.4 Висновки і завдання дослідження

Виробництво та споживання горокартону зростає, що вимагає збільшення обсягів виготовлення виробництва флютингу.

Флютинг є важливою складовою гофрокартону. Він сприймає основне навантаження тари з гофрокартону. Тому від його механічних характеристик найбільше залежить міцність та жорсткість гофрокартону в цілому.

Збільшення темпів виробництва флютингу на ПРМ може обмежуватись процесом сушіння. Важливим методом інтенсифікації сушіння є застосування енергії ІЧВ, що має здатність проникати вглиб матеріалу.

Встановлено, що за допомогою сучасних пристроїв з ІЧ випромінювачами можна досягти високі густини теплові потоки, що збільшить інтенсивність сушіння флютингу.

Для вирішення поставлених задач важливого значення набуває математичне моделювання процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання, що дозволяє на основі числового моделювання здійснювати обґрунтований вибір параметрів обладнання і режимів процесу.

Аналіз тенденцій розвитку процесу та обладнання виробництва паперу, в т.ч. флютингу дозволяє зробити такі висновки:

1. На сучасному етапі розвитку обладнання і технології виробництва паперу лімітуючою стадією є сушіння.
2. ІЧВ для сушіння паперу широко впроваджують в ЦПВ закордоном, проте зовсім не застосовується для цих цілей на Україні.

3. Існуючі математичні моделі процесу сушіння волокнистого матеріалу, в тому числі паперу чи картону, здебільшого описують кондуктивний спосіб передачі тепла [4, 10, 11, 14, 22, 48, 49, 50, 57, 59, 63, 64] або кондуктивно-конвективний спосіб [2, 47, 62].

4. Математичні моделі процесу сушіння волокнистого матеріалу, в тому числі паперу чи картону, із застосуванням енергії ІЧВ [6, 7, 15, 45, 53, 55, 56] не дають змогу розрахувати процес сушіння флютингу із застосуванням ІЧВ в зв'язку з відсутністю необхідних кінетичних закономірностей.

5. Відсутність діючої математичної моделі вимагає для конкретних ІЧ випромінювачів виконувати експериментальні дослідження для визначення кінетичних закономірностей та технологічних параметрів.

6. Відсутність кінетичних закономірностей сушіння флютингу радіаційним способом унеможлиблює визначення його доцільності та інженерну реалізацію.

В зв'язку з цим поставлені такі задачі дослідження:

- на основі аналізу літературних джерел запропонувати фізичну модель та математичне описання процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ;
- розробити експериментальну установку для дослідження кінетичних закономірностей процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ, методику проведення дослідження та провести експериментальні дослідження цього процесу;
- визначити адекватність математичної моделі експериментальним даним;
- на основі числового аналізу отриманих експериментальних даних встановити вплив технологічних параметрів сушіння (густини теплового потоку, маси квадратного метру та початкового вологовмісту флютингу) на кінетику процесу та розробити рекомендації щодо їх вибору;
- запропонувати технічні рішення для сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ;

— розробити алгоритм розрахунку промислової установки для сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ.

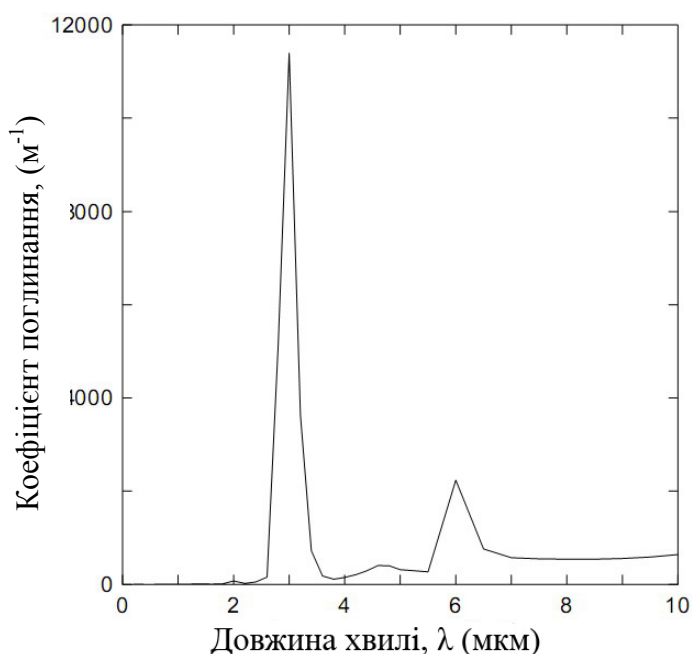
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ФЛЮТИНГУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕНЕРГІЇ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

2.1 Фізична модель процесу

Інфрачервоне випромінювання за різної температури робочої поверхні випромінювача відповідно закону Віна має різну довжину хвилі.

Від довжини інфрачервоних хвиль залежить абсорбційна здатність теплоти вологою матеріалу. Для найбільш ефективного поглинання теплоти і, відповідно, інтенсивного сушіння волога повинна мати найвищу абсорбційну здатність.

Залежність коефіцієнта поглинання теплоти вологою від довжини хвилі зображено на рисунку 2.1 [52, 92].



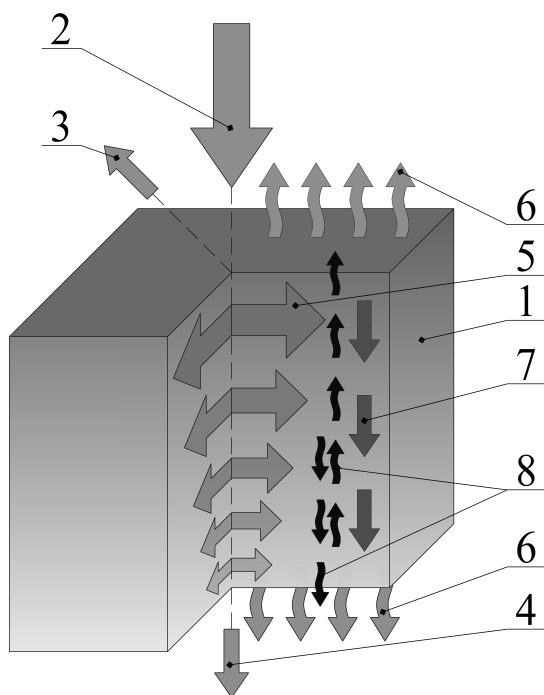
**Рисунок 2.1 – Залежність коефіцієнта поглинання теплоти
волоогою від довжини хвилі випромінювання**

З рисунку 2.1 видно, що поглинальну здатність ІЧВ вологою найбільша в діапазоні середньої довжини хвиль (2 – 7 мкм). В праці [16] показано, що в цьому діапазоні хвиль ступінь поглинання ІЧ випромінювання вологим папером найвищий.

На виробництві використовуються два типи випромінювачів: електричні та газові. За допомогою електричних можна отримати більші значення теплових потоків [3]. Проте газові випромінювачі завдяки меншій температурі робочої поверхні мають довжину генеруємих хвиль, що краще поглинаються вологою [43, 54]. Електричні випромінювачі ІЧВ здебільшого мають довжину хвиль 0,7-1,4 мкм. а газові 1,6-10 мкм [52].

Тепловий ККД газових ІЧ випромінювачів може становити лише 30 % [60], а ККД електричних випромінювачів становить близько 90 % [78].

Інфрачервоне випромінювання, що генерується електричним ІЧ випромінювачем, спрямоване на поверхню вологого флютингу (рисунок 2.2).



1 – флютинг; 2 – тепловий потік ІЧВ; 3 – віддзеркалене ІЧВ; 4 – ІЧВ, що пройшло наскрізь; 5 – поглинуте ІЧВ; 6 –теповіддача; 7 – теплопровідність; 8 – потік пари
Рисунок 2.2 – Схема руху теплоти та вологи по товщині флютингу

Вологий флютинг є сірим тілом, що має відбивну, поглинальну та пропускну здатність. Ці властивості змінюються зі зміненням співвідношення маси флютингу та кількості в ньому вологи. Між флютингом – пористим тілом, та ІЧ випромінювачем є шар суміші повітря з водяною парою (газ). Частина теплоти від ІЧВ може поглинатися парою.

Під час сушіння флютингу із застосуванням ІЧВ теплова енергія передається вологому матеріалу шляхом проникнення інфрачервоних променів в увесь його об'єм [88, 94]. Кількість виділеної теплоти по товщині флютингу

зменшується за напрямком теплового потоку відповідно закону Бугера. В зв'язку з цим виникає градієнт температури, що направлений від більш нагрітих поверхневих шарів флютингу до менш нагрітих вглиб нього [71]. Через наявність термоградієнту деяка кількість теплоти переноситься теплопровідністю в напрямку проходження ІЧ випромінювання. За великих значень теплового потоку та товщини флютингу перенесення теплоти може здійснюватись парою.

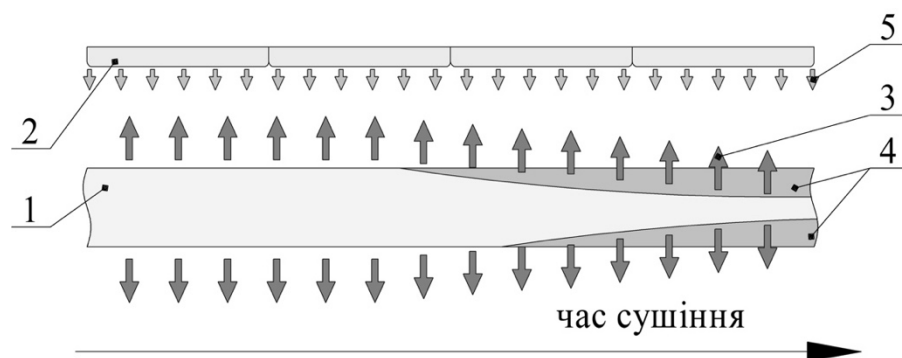
Теплота з поверхні флютингу переноситься в оточуюче середовище завдяки конвективній тепловіддачі від поверхонь, а також з утвореною парою.

Під час нагрівання вологого флютингу починається процес сушіння. Його інтенсивність найбільша в поверхневих шарах, де найвища кількість виділеної теплоти, та зменшується вглиб матеріалу. На поверхні флютингу виникає шар насиченої водяної пари, що створює найбільшим дифузійний опір переносу вологи в оточуюче середовище.

Рушійною силою процесу сушіння в першому періоді є різниця між тиском насиченої водяної пари в пограничному шарі на поверхнях та парціальним тиском пари в навколишньому середовищі.

Рушійною силою процесу сушіння в другому періоді, очевидно, є різниця величин поточного вологовмісту та кінцевого рівноважного [84].

Під час сушіння випаровування з поверхні флютингу поширюється в більш глибокі шари (рисунок 2.3) [1, 15, 17].



1 – полотно флютингу; 2 – ІЧ випромінювачі; 3 – випаровування вологи; 4 – заглиблення зони випаровування; 5 – ІЧВ

Рисунок 2.3 – Заглиблення зони випаровування

У флютингу як капілярно-пористому тілі знаходиться вільна волога, волога в мікрокапілярах та адсорбційно зв'язана волога [84]. В першому періоді сушіння випаровується вільна волога, а швидкість процесу обмежена густиною теплового потоку. В другому періоді сушіння швидкість спочатку обмежена дифузією вологи в зону випаровування (видаленням вологи в мікрокапілярах) [61], а під кінець сушіння лімітується руйнуванням адсорбційних зв'язків вологи з волокнами флютингу та її випаровуванням.

До початку сушіння вологовміст та температура однакові по всій товщині флютингу. Під час проходження ІЧВ через флютинг в поверхневих шарах, де найвища кількість поглинутої теплоти, значення температури найбільше, а вологовміст найменший (рисунки 2.4 та 2.5).

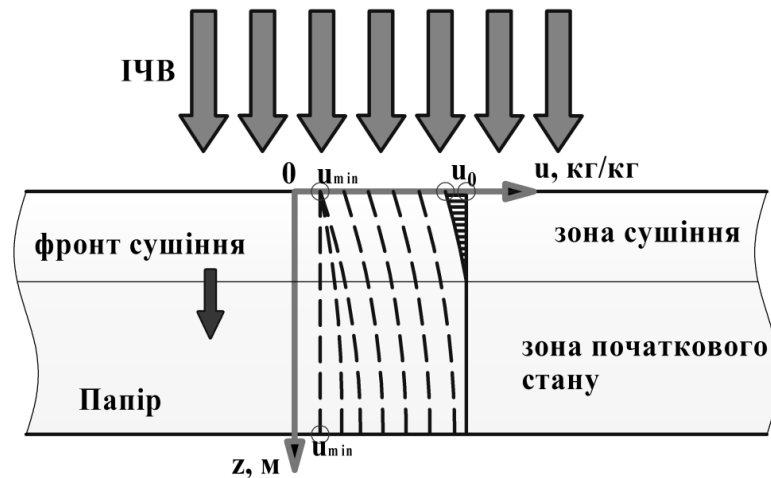


Рисунок 2.4 – Зміна вологовмісту по товщині флютингу

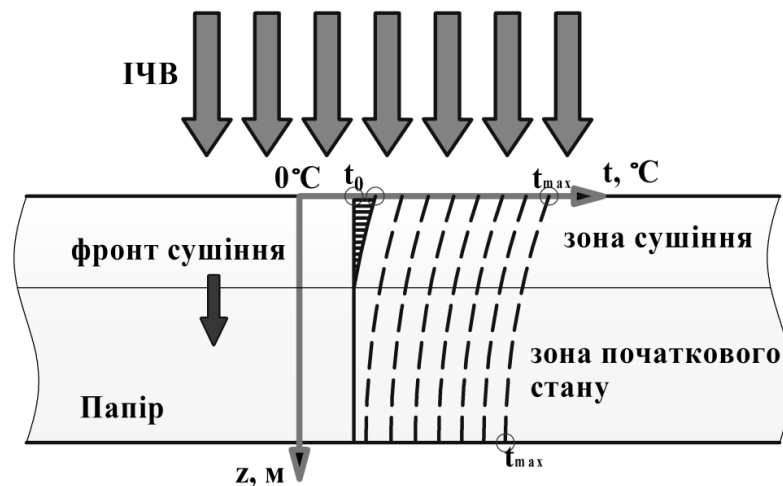


Рисунок 2.5 – Зміна температури по товщині флютингу

Під час проходження ІЧВ через флютинг кількість виділеної теплоти зменшується, а температура, відповідно, спадає. Вологовміст за цих умов збільшується. В кінці сушіння вологовміст досягає рівноважного значення та вирівнюється по товщині флютингу.

За конвективно-радіаційного способу сушіння температура поверхні флютингу може бути меншою температури газоподібного оточення. Це змінить напрям теплового потоку і флютинг буде отримувати більшу кількість теплоти завдяки конвективній складовій. В такому випадку теплові втрати від флютингу будуть лише за умови, що температура його поверхні стане більшою оточуючого до флютингу середовища.

За комбінованого радіаційно-кондуктивного способу сушіння з протилежної відносно випромінювача сторони флютинг контактує з нагрітою поверхнею сушильного циліндра. Це дозволить збільшити кількість теплоти, прогриваючи папір одночасно з обох сторін. В такому випадку теплові втрати відбуваються лише з ближньої до випромінювача сторони, де температура газоподібного теплоносія нижча за температуру поверхні флютингу.

За комбінованого конвективного та радіаційно-кондуктивного способу теплота надходить одночасно від гарячої поверхні з однієї сторони флютингу та від нагрітого газоподібного теплоносія та ІЧВ з іншої.

Турбулізація потоку теплоносія біля поверхні флютингу зменшує товщину пограничного шару, інтенсифікуючи процес сушіння.

2.2 Математичне моделювання процесу

При сушінні флютингу на папероробній машині із застосуванням енергії ІЧВ можливі різні конструкції пристроїв ІЧ випромінювання. Одним з найбільш раціональних рішень є встановлення випромінювачів на вільному пробігу паперового полотна між сушильними циліндрами або замість них. За цих умов всередині паперового полотна та на межі з оточуючим середовищем теплота переноситься завдяки радіаційній складовій від випромінювачів, кондуктивній

(від переносу тепла всередині матеріалу теплопровідністю) та конвективній (від контакту поверхні паперу з газоподібним теплоносієм під час руху на ПРМ).

Розглянемо модель проходження теплових потоків, що виникають від дії ІЧВ на поверхню флютингу [18].

У загальному випадку рівняння теплообміну для напівпрозорого середовища в дивергентній формі має вигляд [69, 76, 101, 111]:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\text{div}(\mathbf{q}_\lambda + \mathbf{q}_r) + q_v \quad (2.1)$$

де c_p – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К); ρ – густина, кг/м³; T – абсолютна температура, К; τ – час, с; $\mathbf{q}_\lambda = -\lambda \text{grad} T = -\lambda \nabla T$ – вектор густини теплового потоку, що визначається законом Фур'є, Вт/м²; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ – оператор Гамільтона, м⁻¹; x, y, z – декартові координати, м; \mathbf{q}_r – вектор густини радіаційного теплового потоку, Вт/м²; q_v – внутрішнє джерело теплоти, що, наприклад, пов'язано з випаровуванням та транспортом вологи, Вт/м³.

Вектор густини радіаційного теплового потоку визначається за рівнянням [76]:

$$\mathbf{q}_r = \int_{\nu=0}^{\infty} K_\nu \left(\int_{\Omega=4\pi} \vec{I}_\nu d\Omega - 4\pi n_\nu^2 I_{0\nu}(T) \right) d\nu \quad (2.2)$$

де K_ν і n_ν – спектральний коефіцієнт поглинання (м⁻¹) і показник заломлення; Ω – тілесний кут, ср; $I_{0\nu}$ – функція Планка, Вт·с/(м²·ср); \vec{I}_ν – вектор спектральної інтенсивності випромінювання (Вт·с/(м²·ср)) для напрямку S у тілесному куті $d\Omega$; s_0 – відповідає границі області; ν – частота випромінювання, Гц;

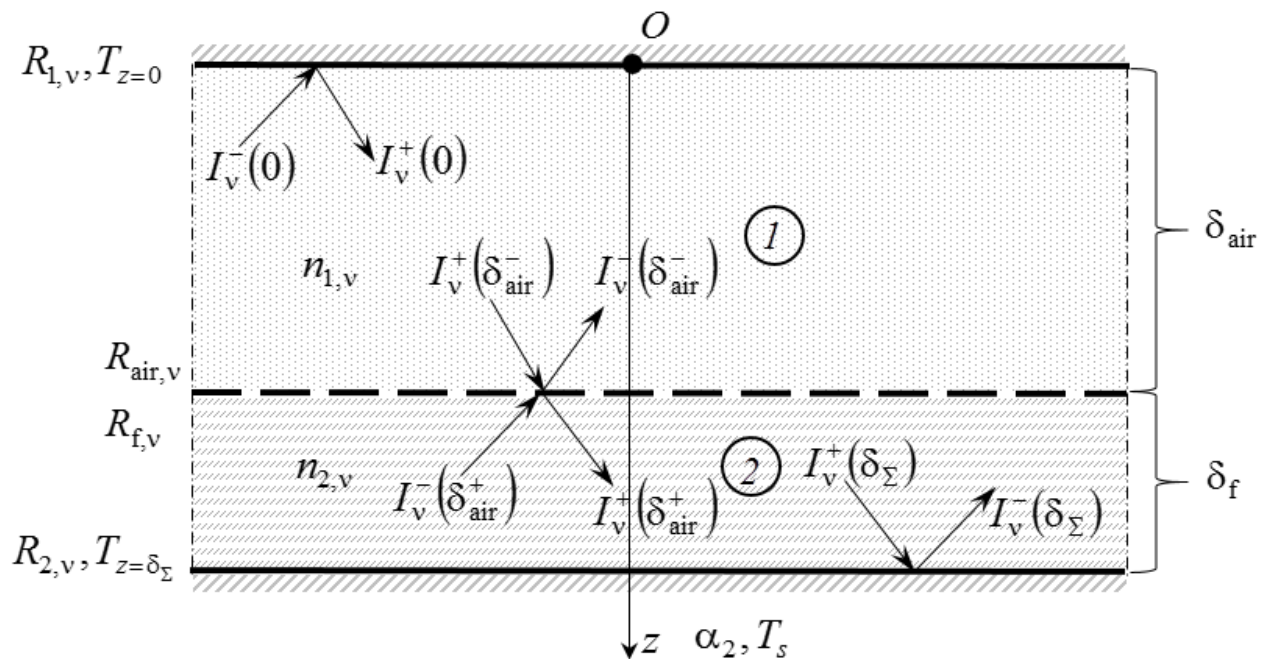
Вектор спектральної інтенсивності випромінювання з рівняння переносу визначається як [76]:

$$\vec{I}_v(s) = \vec{I}_v(s_0) \exp\left(-\int_{s_0}^s K_v ds\right) + \int_{s_0}^s n_v^2 I_{0v} K_v \exp\left(-\int_{s'}^s K_v ds''\right) ds' \quad (2.3)$$

Для однозначності рівняння (2.1) необхідно записати відповідні початкові та граничні умови.

Інтегрально-диференціальне рівняння (2.1) є тривимірним та є досить складним для його наближеного розв'язання числовими методами [69, 76, 101, 111]. Однак, технологічний режим та обладнання для радіаційного сушіння флютингу дають можливість розглядати цей процес як одномірний [15, 55, 56]. Тому розглянемо головні припущення для запису основних співвідношень нестационарного теплообміну в одновимірному випадку [68]:

– поле температур та інші поля, що є похідними від нього, є одновимірними та змінюються тільки в напрямку вісі Oz вглиб флютингу (рисунок 2.6);



1 – шар повітря з водяною парою; 2 – шар волого флютингу

Рисунок 2.6 – Схема області для формулювання одновимірної нестационарної математичної моделі стосовно сушіння флютингу

- область моделювання складається з двох шарів: верхнього, який є сумішшю повітря з водяною парою (газ), та нижнього – вологого флютингу, що є пористим тілом (далі – система), що піддається процесу радіаційного сушіння (тобто система є двофазною);
- теплофізичні властивості (масова ізобарна теплоємність, густина та коефіцієнт теплопровідності) є ефективними значеннями та залежать від температури;
- шар газу вважається нерухомим, оскільки температура флютингу вища або дорівнює оточуючому газоподібному теплоносію (отже конвективна складова не є джерелом підведення теплоти);
- система з точки зору радіаційних властивостей є селективною напівпрозорою нерозсіювальною, поглинальною та випромінювальною; верхня границя системи (радіаційний випромінювач) є непрозорою, границя між шарами напівпрозора, а нижня сторона флютингу для спрощення приймається непрозорою;
- всі границі системи є дифузними, тобто відбивання не залежить від напрямку;
- радіаційні властивості (коефіцієнт поглинання, показник заломлення, ступінь чорноти та коефіцієнти відбивання границь системи) є селективними (залежать від частоти випромінювання або довжини хвилі).

В одновимірному випадку для напрямку осі Oz рівняння РКТ (2.1) для системи газ – пористе тіло набуває вигляду:

$$c_{pi\text{ eff}}(T)\rho_{i\text{ eff}}(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{i\text{ eff}}(T)\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{\partial q_{ri}}{\partial z} + q_{vi} \quad (2.4)$$

де $i=1, 2$ – індекс фази: для $i=1$ – суміш повітря з водяною парою, для $i=2$ – вологий флютинг (рисунки 2.6); $c_{pi\text{ eff}}(T)$ – ефективна масова ізобарна теплоємність i -ї фази, Дж/(кг·К); $\rho_{i\text{ eff}}(T)$ – ефективна густина i -ї фази, кг/м³;

$\lambda_{i\text{eff}}(T)$ – ефективний коефіцієнт теплопровідності i -ї фази, Вт/(кг·К); $\frac{\partial \mathbf{q}_r}{\partial z}$ – дивергенція густини вектору радіаційного теплового потоку, Вт/м³; \mathbf{q}_r – вектор густини радіаційного теплового потоку, Вт/м²; T – абсолютна температура, К; τ – час, с; z – координата, м; $q_{vi} = \begin{cases} 0, & i = 1; \\ -\rho_{2f}(T)r\frac{du}{d\tau}, & i = 2, \end{cases}$ – об’ємна густина джерела теплоти за рахунок випаровування та транспорту вологи з флютингу, Вт/м³; r – масова теплота випаровування води, Дж/кг; $\frac{du}{d\tau}$ – відносна швидкість випаровування та транспорту вологи, с⁻¹ (кг/(кг·с)) [84].

У рівнянні (2.4) в ефективних значеннях теплофізичних величин враховується вміст водяної пари в повітрі або вологи в пористому флютингу за правилом адитивності відповідно їх відносних вологостей.

Початкові умови для (2.4), $\tau=0$:

$$T = T(z), \quad 0 \leq z \leq \delta_{\text{air}} + \delta_f = \delta_{\Sigma} \quad (2.5)$$

де $\delta_{\text{air}}, \delta_f$ – товщина шару вологого повітря і вологого флютингу, відповідно, м; δ_{Σ} – сумарна товщина шарів, м.

Граничні умови для (2.4), $\tau > 0$:

– на верхній непрозорій границі радіаційний нагрівник – вологе повітря ($z = 0$) приймаються граничні умови I роду:

$$T|_{z=0} = T_1 = T(W(\tau)), \quad (2.6)$$

де $W(\tau)$ – залежність зміни електричної потужності радіаційного нагрівника від часу, Вт. На цій границі також задається ступінь чорноти $\epsilon_{1,\nu} = f_{\epsilon 1}(\nu)$ або коефіцієнт відбивання $R_{1,\nu} = 1 - \epsilon_{1,\nu}$ для опису радіаційної складової рівняння (2), де ν – частота випромінювання, Гц;

– на напівпрозорій границі між шаром газу і флютингу розглядаються граничні умови абсолютного контакту або IV роду

$$\begin{cases} \{T\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_\lambda\} = 0, \end{cases} \quad (2.7)$$

$\{T\} = T^+ - T^-$ – температури ліворуч і праворуч в околі напівпрозорої границі; $\{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_\lambda\} = \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{q}_\lambda^+ - \mathbf{n}^+ \cdot \mathbf{q}_\lambda^-$; $\mathbf{q}_\lambda^+ = -\lambda_{2\text{eff}}(T)\nabla T$, $\mathbf{q}_\lambda^- = -\lambda_{1\text{eff}}(T)\nabla T$ – вектор густини теплового потоку в околі напівпрозорої границі зі сторін вологого флютингу та повітря, відповідно, Вт/м²; $\nabla = \frac{\partial}{\partial z}$ – оператор Гамільтона в одновимірному випадку, м⁻¹; \mathbf{n}^- , \mathbf{n}^+ – вектори зовнішньої нормалі до напівпрозорої границі зі сторін вологого флютингу та повітря, відповідно. На цій границі також треба визначити та задати коефіцієнт відбивання в шар газу $R_{\text{air},v} = f_{\text{air},v}(v)$ та коефіцієнт відбивання в шар флютингу $R_{f,v} = f_{f,v}(v)$ від напівпрозорої границі;

– на нижній непрозорій границі нижня сторона флютингу – оточуюче середовище ($z = \delta_\Sigma$) розглядаються граничні умови III роду:

$$\mathbf{n} \cdot \left(-\lambda_{2\text{eff}}(T)\nabla T \right) \Big|_{z=\delta_\Sigma} = \alpha_2(T - T_s) \quad (2.8)$$

де α_2 – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_s – температура навколишнього середовища, К. На цій границі також задається ступінь чорноти $\varepsilon_{2,v} = f_{\varepsilon_2}(v)$ або коефіцієнт віддзеркалення $R_{2,v} = 1 - \varepsilon_{2,v}$.

Густина радіаційного потоку в одновимірній системі, що складається з двох різних за своїми властивостями шарів селективно-випромінювальних та поглинальних середовищ, описується системою рівнянь переносу [68]:

$$\begin{cases} \mu_i \frac{\partial \vec{I}_v^+(z, \mu_i)}{\partial z} = -K_{i,v} [\vec{I}_v^+(z, \mu_i) - n_{i,v}^2 I_{bv}(T(z))] \\ \mu_i \frac{\partial \vec{I}_v^-(z, \mu_i)}{\partial z} = K_{i,v} [\vec{I}_v^-(z, \mu_i) - n_{i,v}^2 I_{bv}(T(z))] \end{cases} \quad (2.9)$$

де $i = 1, 2$ – відноситься до вологого повітря та вологого флютингу; \vec{I}_v^+, \vec{I}_v^- – спектральна інтенсивність випромінювання в додатному та від'ємному напрямках, відповідно, Вт·с/(м²·ср); $I_{bv}(T(z))$ – функція Планка, Вт·с/(м²·ср); $\mu = |\cos \varphi|$; φ – кут між вектором інтенсивності випромінювання та віссю z (відхилення від вертикалі), рад; n_v – спектральний показник заломлення; K_v – спектральний коефіцієнт поглинання, м⁻¹; ν – частота випромінювання, Гц.

В (2.9) і далі за текстом коефіцієнти поглинання середовищ теж є ефективними значеннями. Так, наприклад, для вологого флютингу цей коефіцієнт визначається за формулою:

$$K_{2,v} = K_{f,v}(1 - w) + K_{w,v}w \quad (2.10)$$

де $K_{f,v}$, $K_{w,v}$ – коефіцієнти поглинання сухого флютингу та води, м⁻¹; w – об'ємна частка вологи у флютингу.

Вектор густини радіаційного потоку в будь-якій точці системі вологе повітря та флютинг визначається співвідношенням [111]:

$$\mathbf{q}_r(z) = q_r(z) = 2\pi \int_{\nu=0}^{\nu_{tr}} \left\{ \int_0^1 [\vec{I}_v^+(z, \mu_i) - \vec{I}_v^-(z, \mu_i)] \mu_i d\mu_i \right\} d\nu \quad (2.11)$$

де ν_{tr} – границя пропускання теплового випромінювання в ІЧ області спектра, Гц.

Тут і далі, оскільки вектор густини радіаційного потоку збігається з віссю Oz , то у виразі замість вектора записано його величина.

Після диференціювання підінтегрального виразу (2.11) за параметром z отримується формула для визначення $\frac{\partial q_r}{\partial z}$, що входить в рівняння (2.4) через частинні похідні:

$$\frac{\partial q_r(z)}{\partial z} = 2\pi \int_{v=0}^{v_{tr}} \left\{ \int_0^1 \left[\frac{\partial \tilde{I}_v^+(z, \mu_i)}{\partial z} - \frac{\partial \tilde{I}_v^-(z, \mu_i)}{\partial z} \right] \mu_i d\mu_i \right\} dv \quad (2.12)$$

Для виключення частинних похідних в підінтегральному виразі необхідно підставити відповідні вирази з системи рівнянь (2.9), що в результаті дає

$$\frac{\partial q_r(z)}{\partial z} = -2\pi K_{i,v} \int_{v=0}^{v_{tr}} \left\{ \int_0^1 [\tilde{I}_v^+(z, \mu_i) - \tilde{I}_v^-(z, \mu_i)] d\mu_i - 2n_{i,v}^2 I_{bv}(T(z)) \right\} dv \quad (2.13)$$

Для визначення величин (2.11), (2.12) необхідно спочатку записати граничні умови для випромінювання на непрозорих, на напівпрозорій границях. В умовах дифузної моделі відбиття граничні умови набувають вигляду [68]:

$$\begin{cases} I_v^+(0) = n_{1,v}^2 (1 - R_{1,v}) I_{bv}(T_{z=0}) + 2R_{1,v} \int_0^1 \tilde{I}_v^-(0, \mu_1) \mu_1 d\mu_1; \\ I_v^-(\delta_{air}^-) = 2R_{air,v} \int_0^1 \tilde{I}_v^+(\delta_{air}^-, \mu_1) \mu_1 d\mu_1 + 2(1 - R_{f,v}) \int_0^1 \tilde{I}_v^-(\delta_{air}^+, \mu_2) \mu_2 d\mu_2, \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} I_v^+(\delta_{air}^+) = 2R_{f,v} \int_0^1 \tilde{I}_v^-(\delta_{air}^+, \mu_2) \mu_2 d\mu_2 + 2(1 - R_{air,v}) \int_0^1 \tilde{I}_v^+(\delta_{air}^-, \mu_1) \mu_1 d\mu_1; \\ I_v^-(\delta_{\Sigma}^-) = n_{2,v}^2 (1 - R_{2,v}) I_{bv}(T_{z=\delta_{\Sigma}}) + 2R_{2,v} \int_0^1 \tilde{I}_v^+(\delta_{\Sigma}, \mu_1) \mu_1 d\mu_1, \end{cases} \quad (2.15)$$

де $T_{z=0}$, $T_{z=\delta_{\Sigma}}$ – температури відповідних непрозорих границь системи газ – пористе тіло, К.

В системах рівнянь (2.14) та (2.15) $I_v^+(0)$ і $I_v^-(\delta_{\Sigma}^-)$ відносяться до непрозорих границь системи газ – пористе тіло, а $I_v^{\pm}(\delta_{air}^{\pm})$ – до напівпрозорої

границі між шарами вологого повітря та волого флютингу. Спектральні значення величини $R_{\text{air},v}$ визначаються з формул Френеля [111] з подальшим інтегруванням за напрямком (при цьому приймається $n_{1,v} \approx 1$ як для газового середовища), а спектральні величини $R_{f,v}$ з умови збереження балансу енергії випромінювання на напівпрозорій границі

$$(1 - R_{\text{air},v})n_{1,v}^2 = (1 - R_{f,v})n_{2,v}^2 \rightarrow 1 - R_{\text{air},v} = (1 - R_{f,v})n_{2,v}^2 \quad (2.16)$$

де $n_{1,v} \approx 1$.

Розглянемо співвідношення для одержання селективних значень $\epsilon_{f,v} = 1 - R_{f,v}$ на напівпрозорій границі за допомогою формул Френеля [111] у разі $n_{2,v} > n_{1,v}$, $n_{2,v} = n_{f,v}$, $n_{1,v} \approx 1$

– \perp – складова коефіцієнта віддзеркалення

$$R_{s,v}(\mu) = \frac{\left[n_{1,v}\mu - \sqrt{n_{2,v}^2 - n_{1,v}^2(1 - \mu^2)} \right]^2}{\left[n_{1,v}\mu + \sqrt{n_{2,v}^2 - n_{1,v}^2(1 - \mu^2)} \right]^2} \quad (2.17)$$

$$\rightarrow |n_{1,v} \approx 1| = R_{s,v}(\mu) = \frac{\left[\mu - \sqrt{n_{2,v}^2 - (1 - \mu^2)} \right]^2}{\left[\mu + \sqrt{n_{2,v}^2 - (1 - \mu^2)} \right]^2} \quad (2.18)$$

– $||$ – складова коефіцієнта віддзеркалення

$$R_{p,v}(\mu) = \frac{\left[n_{2,v}^2\mu - n_{1,v}\sqrt{n_{2,v}^2 - n_{1,v}^2(1 - \mu^2)} \right]^2}{\left[n_{2,v}^2\mu + n_{1,v}\sqrt{n_{2,v}^2 - n_{1,v}^2(1 - \mu^2)} \right]^2} \quad (2.19)$$

$$\rightarrow |n_{1,v} \approx 1| = R_{p,v}(\mu) = \frac{\left[n_{2,v}^2\mu - \sqrt{n_{2,v}^2 - (1 - \mu^2)} \right]^2}{\left[n_{2,v}^2\mu + \sqrt{n_{2,v}^2 - (1 - \mu^2)} \right]^2} \quad (2.20)$$

$$R_v(\mu) = \frac{1}{2} (R_{s,v}(\mu) + R_{p,v}(\mu)) \quad (2.21)$$

Тоді селективний напівсферичний ступінь чорноти поверхні вологе повітря-флютинг в сторону вологого повітря визначається за формулою:

$$\varepsilon_{air,v} = 2 \int_0^1 (1 - R_v(\mu)) \mu d\mu, \quad R_{air,v} = 1 - \varepsilon_{air,v} \quad (2.22)$$

Ступінь чорноти поверхні вологе повітря – флютинг в напрямку флютингу:

$$1 - R_{air,v} = (1 - R_{f,v}) n_{2,v}^2 \rightarrow \varepsilon_{air,v} = \varepsilon_{f,v} n_{2,v}^2, \quad (2.23)$$

звідки

$$\varepsilon_{f,v} = \frac{\varepsilon_{air,v}}{n_{2,v}^2} \quad (2.24)$$

Тобто за умови $n_{2,v} > 1$ виконується нерівність $\varepsilon_{f,v} < \varepsilon_{air,v}$.

Для отримання остаточних рівнянь для визначення густини потоку радіаційного випромінювання та його дивергенції необхідно розв'язати систему дванадцяти рівнянь, що складається з (2.14), (2.15), формальних розв'язків (2.9) для граничних поверхонь системи та поточних значень координати z [68].

Таким чином система рівнянь (2.4)–(2.24) є повним математичним формулюванням задачі селективної РКТ стосовно сушіння флютингу ІЧ випромінювачами. Причому вирази для \mathbf{q}_r і $\frac{\partial \mathbf{q}_r}{\partial z}$ є точними аналітичними формулами для визначення густини радіаційного потоку та його дивергенції в одновимірному випадку.

Діапазон хвиль від промислових випромінювачів близький до діапазону найбільшої поглинальної здатності води. Тому модель можна спростити від селективної до сірої.

Для переходу від селективного середовища до більш простої моделі «сірого» середовища необхідно всі радіаційні властивості фаз та границь системи осереднити наприклад за Роселандом [101], а функцію Планка в (2.9),

(2.13)–(2.24) замінити виразом $\frac{\sigma}{\pi}$, де σ – стала Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴).

Середнє «сіре» значення коефіцієнта K поглинання за Роселандом визначається співвідношенням:

$$\frac{1}{K} = \int_{\nu=0}^{\nu_{tr}} \frac{1}{K_{\nu}} \frac{\partial I_{b\nu}(T)}{\partial I_b(T)} d\nu \approx \sum_{m=1}^M \frac{1}{K_m} [f_{0-\nu_m}^*(T) - f_{0-\nu_{m-1}}^*(T)] \quad (2.25)$$

де K_m – середнє значення K_{ν} на інтервалі частот $\nu_m - \nu_{m-1}$, м⁻¹; $f_{0-\nu_m}^*(T)$ – функції випромінювання другого роду [76, 101].

В літературному огляді встановлено, що при моделюванні радіаційного сушіння матеріалів з близькими до флютингу властивостями дослідниками використано спрощену модель на основі рівняння Бугера [15, 55, 56]. Отримані результати з достатньою точністю описували процес. Тому вирішено використати спрощену математичну модель на основі рівняння Бугера, а перенос теплоти від ІЧ випромінювача до поверхні флютингу описати за законом Стефана-Больцмана.

Якщо скористатися наближенням оптично тонкого шару з поправкою на поглинання [79, 101] та використати модель Бугера для визначення зміни густини радіаційного потоку в шарі вологого флютингу [84], то математичне формулювання одновимірної задачі РКТ процесу сушіння флютингу значно спрощується. Середовище, що являє собою вологий флютинг, приймається напівпрозорим «сірим» і поглинальним, а границі його шару та поверхня ІЧ нагрівника – дифузними. При цьому можна обмежитися розглядом тільки шару матеріалу флютингу, але з більш складними умова зовнішнього теплообміну ніж для двохфазного селективного середовища. За такого наближення математична постановка задачі з врахуванням кінетики сушіння [84] включає систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{p\,eff}(T)\rho_{eff}(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{eff}(T)\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{\partial q_r(z)}{\partial z} - \rho_f(T)r\frac{du}{d\tau}; \\ q_r(z) = nq_r(T_{z=0})e^{-\int_0^z K(T(z))dz}; \\ q_r(T_{z=0}) = \varepsilon_{pr}(K_{a-v})\sigma(T_{IR}^4 - T_{z=0}^4); \\ \frac{du}{d\tau} = \frac{\beta}{g}[p_n(T_{z=0}^+) - p_n(T_{z=0}^-)] + k(u - u_p), \end{array} \right. \quad (2.26)$$

де $c_{p\,eff}(T)$ – температурна залежність масової ізобарної теплоємності вологого флютингу, Дж/(кг·К); $\rho_{eff}(T)$ – температурна залежність ефективної густини вологого флютингу, кг/м³; $\rho_f(T)$ – температурна залежність густини абсолютно сухого флютингу, кг/м³; T – абсолютна температура, К; τ – час, с; $\lambda_{eff}(T)$ – температурна залежність ефективного коефіцієнту теплопровідності вологого флютингу, Вт/(м·К); z – декартова координата, м; $q_r(z)$ – вектор густини радіаційного теплового потоку, Вт/м²; n – вектор нормалі до поверхні флютингу; r – масова теплота випаровування води, Дж/кг; $K(T(z))$ – температурна залежність «сірого» значення ефективного коефіцієнта поглинання вологого флютингу, м⁻¹; $du/d\tau$ – швидкість сушіння, с⁻¹ (кг/(кг·с)); ε_{pr} – приведений ступінь чорноти вологого повітря; $\varepsilon_{z=0}$ – ступінь чорноти поверхні флютингу; F_{IR}, F_f – площа поверхонь ІЧ випромінювача та флютингу, відповідно, м²; K_{a-v} – «сіре» значення коефіцієнта поглинання вологого повітря, м⁻¹; σ – стала Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); $T_{IR}, T_{z=0}$ – абсолютна температура поверхонь інфрачервоного випромінювача та флютингу, відповідно, К; β – коефіцієнт вологообміну, с/м; k – константа швидкості сушіння в другому періоді, с⁻¹; g – маса квадратного метру абсолютно сухого флютингу, кг/м²; p_n, p_{Π} – тиск насичення пари на поверхні шару флютингу та парціальний тиск водяної пари в прилеглому шарі оточуючого середовища (вологого повітря) відповідно, Па; u, u_p – середній відносний вологовміст в поточний момент часу і відносний рівноважний у шарі флютингу, відповідно, кг/кг.

Ступінь поглинання енергії ІЧВ вологим флютингом визначається як [76]:

$$\varepsilon_{pr}(K_{a-v}) = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{IR}} + \left(\frac{1}{\varepsilon_{z=0}} - 1 + \frac{3K_{a-v}\delta_{air}}{4} \right) \frac{F_{IR}}{F_f}} \quad (2.27)$$

Ступінь поглинання ІЧВ газоподібним теплоносієм (вологим повітрям), що знаходиться між поверхнею флютингу та робочою поверхнею ІЧ випромінювача, суттєво не зменшує променевий потік через властивості повітря [13] та малої відстані між поверхнями (30-50 мм).

Для отримання дивергенції радіаційного потоку необхідно виконати диференціювання за параметром z підінтегрального виразу, що є показником ступеня в другому рівнянні системи (2.26):

$$\frac{\partial q_r(r)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(q_r(T_{z=0}) e^{-\int_0^z K(T(z)) dz} \right) = |K(T(z)) = \text{const}| = -q_r(T_{z=0}) K e^{-Kz} \quad (2.28)$$

Оскільки вектор густини радіаційного потоку збігається з віссю Oz , то у виразі (2.28) та далі за текстом замість вектору записано його величина.

Рівняння теплопровідності можна також записати через коефіцієнт температуропровідності. Тоді з врахуванням цього та (2.28) система рівнянь (2.26) набуває вигляду:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \tau} = a_{\text{eff}}(T) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_r(T_{z=0})}{c_{p\text{eff}}(T) \rho_{\text{eff}}(T)} K e^{-Kz} - \frac{\rho_f(T)r}{\rho_{\text{eff}}(T) c_{p\text{eff}}(T)} \frac{du}{d\tau}; \\ q_r(T_{z=0}) = \varepsilon_{pr}(K_{a-v}) \sigma (T_{IR}^4 - T_{z=0}^4); \\ \frac{du(T)}{d\tau} = \frac{\beta}{g} [p_H(T_{z=0}^+) - p_H(T_{z=0}^-)] + k(u - u_p), \end{cases} \quad (2.29)$$

де $a_{\text{eff}} = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{c_{p\text{eff}} \rho_{\text{eff}}}$ – ефективна температуропровідність флютингу, $\text{м}^2/\text{с}$.

Рівняння в системі (2.29), що описує зміну вологовмісту під час сушіння флютингу записане на основі рівнянь (1.25) та (1.28).

Для вологого флютингу ефективне «сіре» значення коефіцієнту поглинання виражається формулою за відомим законом адитивності:

$$K = K_f(1 - w) + K_w w \quad (2.30)$$

де K_f , K_w – коефіцієнти поглинання сухого флютингу та води, m^{-1} ; w – об’ємна частка вологи у флютингу.

Решта ефективних властивостей, що входять у систему рівнянь (2.29) отримуються подібним з використання властивості адитивності.

Системи рівнянь (2.26), (2.29) є нелінійними за теплофізичними властивостями та джерельними членами. Так, наприклад, q_r залежить від температури на поверхні флютингу $T_{z=0}$ в четвертому ступені.

Початкові умови для (2.29), $\tau = 0$:

$$T = T(z), \quad 0 \leq z \leq \delta_f \quad (2.31)$$

де δ_f – товщина шару вологого флютингу, м.

Граничні умови для (2.29), $\tau > 0$:

- на непрозорій границі ІЧ випромінювача розглядаються граничні умови І роду

$$T_{IR} = T(W), \quad (2.32)$$

де W – залежність зміни електричної потужності радіаційного нагрівника від часу, Вт. На цій границі також задається «сіре» значення ступеня чорноти робочої поверхні ІЧ випромінювача ϵ_{IR} ;

- на верхній стороні шару флютингу та на нижній задано граничні умови ІІІ роду

$$\mathbf{n} \cdot (-\lambda_{\text{eff}}(T) \nabla T) \big|_{z=0} = \alpha_1 (T - T_{s_1}) \quad (2.33)$$

$$\mathbf{n} \cdot (-\lambda_{\text{eff}}(T) \nabla T) \big|_{z=\delta_f} = \alpha_2 (T - T_{s_2}) \quad (2.34)$$

де \mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі до поверхонь сторін вологого флютингу;
 $\nabla = \frac{\partial}{\partial z}$ – оператор Гамільтона в одновимірному випадку, м^{-1} ; α_1, α_2 – коефіцієнт тепловіддачі з боку верхньої та нижньої сторін шару флютингу, відповідно, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; T_{s_1}, T_{s_2} – температура навколишнього середовища, що оточує шар флютинг з боку його верхньої та нижньої сторін, відповідно, К .

Ефективний коефіцієнт тепловіддачі від поверхні флютингу до навколишнього середовища визначається як :

$$\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{в}} \quad (2.35)$$

де $\alpha_{\text{к}}$ – коефіцієнти тепловіддачі конвекцією, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$; $\alpha_{\text{в}}$ – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням поверхні флютингу, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією:

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{нс}}}{l} \quad (2.36)$$

де l – визначальний розмір, м .

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням поверхнею флютингу [83]:

$$\alpha_{\text{в}} = \frac{\varepsilon_{pr}(K_{a-v})\sigma(T_{z=0,i}^4 - T_{\text{нс}}^4)\bar{H}}{T_{z=0,i} - T_{\text{нс}}} \quad (2.37)$$

де \bar{H} – геометричний (кутовий) коефіцієнт; обирається в залежності від форми полотна флютингу.

Під час теплообміну поверхонь флютингу з навколишнім середовищем за рахунок вільної конвекції критерій Нусельта є функцією числа Релея, тобто добутку чисел Прандтля і Грасгофа [83, 102]:

$$Nu = f(Ra) = f(Gr \cdot Pr) = c \cdot (Gr \cdot Pr_{S_{1,2}}(T))^n \left(\frac{Pr_{S_{1,2}}(T)}{Pr_{nc}(T)} \right)^{0,25} \quad (2.38)$$

Критерій Грасгофа визначається за формулою:

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu_{nc}^2} \beta_p (T_{S_{1,2}} - T_{nc}) \quad (2.39)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; ν – кінематична в'язкість навколишнього середовища, $\text{м}^2/\text{с}$; β_p – коефіцієнт об'ємного розширення, К^{-1} .

Коефіцієнти “с” та “n” з рівняння 2.38 визначаються в залежності від значення добутку чисел Грасгофа на Прандтля відповідно формули Ісаченка [79]:

$$1) \ Gr \cdot Pr \leq 10^9 - c = 0,75, n = 0,25;$$

$$2) \ Gr \cdot Pr \geq 10^9 - c = 0,15, n = 0,33.$$

При наявності обдування та створенні турбулентного режиму число Нусельта визначається як:

$$Nu = f(Re \cdot Pr) = c \cdot Re^n \cdot Pr_{S_{1,2}}^m \left(\frac{Pr_{S_{1,2}}(T)}{Pr_{nc}(T)} \right)^{0,25} \quad (2.40)$$

де $Pr_{S_{1,2}}(T)$, $Pr_{nc}(T)$ – значення чисел Прандтля для газоподібного теплоносія при температурах поблизу поверхні флутингу та в оточуючому середовищі.

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega l}{\nu} \quad (2.41)$$

де ω – швидкість газоподібного теплоносія над поверхнею флутингу, м/с .

Коефіцієнт “с” та показник степеню “n” матимуть такі числові значення [79]:

$$1) \ \text{при } Re \leq 5 \cdot 10^5 - c = 0,66, n = 0,5, m = 0,33;$$

2) при $Re > 5 \cdot 10^5$ – $c = 0,37$, $n = 0,8$, $m = 0,43$.

Математична постановка (2.29)–(2.34) теплообміну з доповненням (2.35)–(2.41) є повним математичним формулюванням нелінійної одновимірної задачі сушіння ІЧ випромінюванням вологого флютингу. За відповідних даних математична модель описує процес сушіння інших типів паперу, наприклад санітарно-гігієнічного, газетного; офсетного та картону [73, 74, 93, 96].

2.3 Вибір методів розв’язання математичного описання процесу

Для числового розв’язання сформульованої задачі (2.29)–(2.34) за математичної моделі скористаємося методом скінченних різниць (МСР), що має ряд переваг [80, 81, 110]. Для цього спочатку виконаємо дискретизацію розрахункової області з використанням рівномірного поділу товщини флютингу на елементарні шари (рисунок 2.7)

$$z = h(i-1), i = \overline{1, n}, h = \frac{\delta_f}{n-1}, \quad (2.42)$$

де n – кількість вузлів.

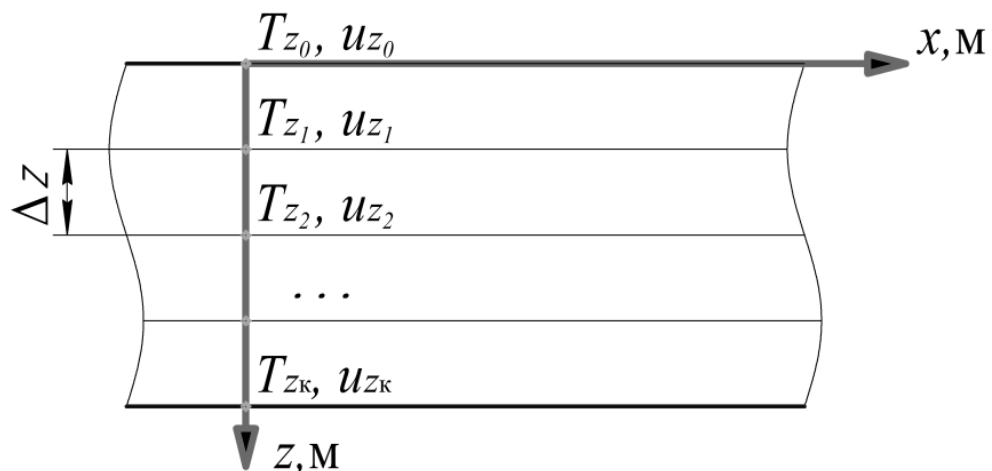


Рисунок 2.7 – Схема поділу товщини флютингу на елементарні шари

Для отримання скінченно-різницевого аналога вихідного диференціального рівняння (2.29) скористаємося абсолютно стійкою чисто неявною схемою з першим порядком апроксимації за часом і другим – за координатою

$$\begin{aligned} \frac{\hat{T}_i - T_i}{\Delta\tau} = & a(\hat{T}_i) \frac{\hat{T}_{i+1} - 2\hat{T}_i + \hat{T}_{i-1}}{h^2} + \\ & + \frac{\varepsilon_{pr}(K_{a-v})}{c_{p\text{eff}}(T_i)\rho_{\text{eff}}(T_i)} \sigma(T_{\text{IR}}^4 - \hat{T}_1^4) K e^{-Kz_i} - q_{vi} + O(\Delta\tau + h^2), \quad i = \overline{2, n-1}, \end{aligned} \quad (2.43)$$

де q_v – джерельний член, пов'язаний з кінетикою випаровування та транспорту вологи в пористому матеріалі – флютингу, К/с.

$$q_v = \frac{\rho_f(T)r}{\rho_{\text{eff}}(T)c_{p\text{eff}}(T)} \frac{du}{d\tau} \quad (2.44)$$

У рівнянні (2.43) і далі знак « \wedge » над температурою означає, що ця температура відноситься до верхнього часового рівня.

Форми запису дискретних аналогів (2.29) для граничних вузлів $i = 1, i = n$ розглянемо дещо нижче за текстом.

Система дискретних рівнянь (2.29) разом з двома граничними рівняннями має трьохдіагональну матрицю, економічним методом розв'язання якої є прогонка [81, 110]. Для компактного запису системи трьохдіагональних алгебричних рівнянь та зручному для застосування рекурентних формул прогонки скористаємося системою виду

$$\begin{cases} -C_1\hat{T}_1 + B_1\hat{T}_2 & = -F_1; \\ A_i\hat{T}_{i-1} - C_i\hat{T}_i + B_i\hat{T}_{i+1} & = -F_i, \quad 2 \leq i \leq n-1; \\ A_n\hat{T}_{n-1} - C_n\hat{T}_n & = -F_n, \end{cases} \quad (2.45)$$

де n – кількість вузлів за координатою, що дорівнює кількості невідомих системи рівнянь.

Перейдемо до запису дискретних рівнянь (2.29) у граничних вузлах. Спочатку розглянемо дискретний аналог граничних умов III роду на верхній поверхні флютингу з першим порядком апроксимації за координатою. Для цього скористаємося фіктивним сітковим вузлом з індексом «0»

$$\begin{aligned}
\lambda(\hat{T}_1) \frac{\hat{T}_1 - \hat{T}_0}{h} &= q_r + \alpha_1 (\hat{T}_1 - T_{s_1}) \rightarrow \hat{T}_1 - \hat{T}_0 = \frac{\alpha_1 h}{\lambda(\hat{T}_1)} (\hat{T}_1 - T_{s_1}) \rightarrow \\
\rightarrow \hat{T}_0 &= \hat{T}_1 - \frac{\alpha_1 h}{\lambda(\hat{T}_1)} \hat{T}_1 + \frac{\alpha_1 h}{\lambda(\hat{T}_1)} T_{s_1}.
\end{aligned} \tag{2.46}$$

Далі підставимо вираз для \hat{T}_0 дискретне рівняння для вузла $i = 1$

$$\begin{aligned}
\frac{\hat{T}_1 - T_1}{\Delta\tau} &= a(\hat{T}_1) \frac{\hat{T}_2 - 2\hat{T}_1 + \hat{T}_0}{h^2} + \\
&+ \frac{\varepsilon_{pr}(K_{a-v})}{c_{p\text{ eff}}(T_1)\rho_{\text{eff}}(T_1)} \sigma(T_{\text{IR}}^4 - \hat{T}_1^4) K e^{-Kz_1} - q_{v1},
\end{aligned} \tag{2.47}$$

отримаємо

$$\begin{aligned}
\frac{\hat{T}_1 - T_1}{\Delta\tau} &= a(\hat{T}_1) \frac{\hat{T}_2 - 2\hat{T}_1 + \hat{T}_1 - \frac{\alpha_1 h}{\lambda(\hat{T}_1)} \hat{T}_1 + \frac{\alpha_1 h}{\lambda(\hat{T}_1)} T_{s_1}}{h^2} + \\
&+ \frac{\varepsilon_{pr}(K_{a-v})}{c_{p\text{ eff}}(T_1)\rho_{\text{eff}}(T_1)} \sigma(T_{\text{IR}}^4 - \hat{T}_1^4) K e^{-Kz_1} - q_{v1},
\end{aligned} \tag{2.48}$$

Після спрощення будемо мати таке рівняння

$$\begin{aligned}
\frac{\hat{T}_1 - T_1}{\Delta\tau} &= a(\hat{T}_1) \frac{\hat{T}_2 - \hat{T}_1 - \frac{\alpha_1 h}{\lambda(\hat{T}_1)} \hat{T}_1 + \frac{\alpha_1 h}{\lambda(\hat{T}_1)} T_{s_1}}{h^2} + \\
&+ \frac{\varepsilon_{pr}(K_{a-v})}{c_{p\text{ eff}}(T_1)\rho_{\text{eff}}(T_1)} \sigma(T_{\text{IR}}^4 - \hat{T}_1^4) K e^{-Kz_1} - q_{v1}.
\end{aligned} \tag{2.49}$$

Розглянемо дискретний аналог граничних умов III роду на нижній поверхні флютингу також з першим порядком апроксимації за координатою. Для цього скористаємося фіктивним сітковим вузлом з індексом « $n+1$ »

$$\begin{aligned}
-\lambda(\hat{T}_n) \frac{\hat{T}_{n+1} - \hat{T}_n}{h} &= \alpha_2 (\hat{T}_n - T_{s_2}) \rightarrow -\hat{T}_{n+1} + \hat{T}_n = \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} (\hat{T}_n - T_{s_2}) \rightarrow \\
\rightarrow \hat{T}_{n+1} &= \hat{T}_n - \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} \hat{T}_n + \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} T_{s_2}.
\end{aligned} \tag{2.50}$$

Після підстановки виразу для \hat{T}_{n+1} дискретне рівняння для вузла $i=n$

$$\begin{aligned} \frac{\hat{T}_n - T_n}{\Delta\tau} = & a(\hat{T}_n) \frac{\hat{T}_{n+1} - 2\hat{T}_n + \hat{T}_{n-1}}{h^2} + \\ & + \frac{\varepsilon_{pr}(K_{a-v})}{c_{p\text{ eff}}(T_n)\rho_{\text{ eff}}(T_n)} \sigma(T_{\text{IR}}^4 - \hat{T}_1^4) K e^{-Kz_n} - q_{vn}, \end{aligned} \quad (2.51)$$

отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{\hat{T}_n - T_n}{\Delta\tau} = & a(\hat{T}_n) \frac{\hat{T}_n - \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} \hat{T}_n + \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} T_{s_2} - 2\hat{T}_n + \hat{T}_{n-1}}{h^2} + \\ & + \frac{\varepsilon_{pr}(K_{a-v})}{c_{p\text{ eff}}(T_n)\rho_{\text{ eff}}(T_n)} \sigma(T_{\text{IR}}^4 - \hat{T}_1^4) K e^{-Kz_n} - q_{vn}. \end{aligned} \quad (2.52)$$

Після спрощення будемо мати таке рівняння

$$\begin{aligned} \frac{\hat{T}_n - T_n}{\Delta\tau} = & a(\hat{T}_n) \frac{-\hat{T}_n - \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} \hat{T}_n + \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} T_{s_2} + \hat{T}_{n-1}}{h^2} + \\ & + \frac{\varepsilon_{pr}(K_{a-v})}{c_{p\text{ eff}}(T_n)\rho_{\text{ eff}}(T_n)} \sigma(T_{\text{IR}}^4 - \hat{T}_1^4) K e^{-Kz_n} - q_{vn}. \end{aligned} \quad (2.53)$$

Система отриманих дискретних рівнянь, що складається з (2.43), (2.49), (2.53) є нелінійною за температурою. Тому для її розв'язання необхідно використовувати ітераційні методи, наприклад, лінеаризацію дискретних рівнянь за методом Ньютона [110]. Виконаємо часткову лінеаризацію (2.43), (2.49), (2.53) за методом Ньютона. В результаті отримаємо такі модифіковані рівняння:

– для (2.49) будемо мати

$$\begin{aligned} \frac{\hat{T}_1 + \delta\hat{T}_1 - T_1}{\Delta\tau} = & a(\hat{T}_1) \frac{\hat{T}_2 - \hat{T}_1 - \frac{\alpha_1 h}{\lambda(\hat{T}_1)} \hat{T}_1 + \frac{\alpha_1 h}{\lambda(\hat{T}_1)} T_{s_1}}{h^2} + a(\hat{T}_1) \frac{\delta\hat{T}_2 - \delta\hat{T}_1 - \frac{\alpha_1 h}{\lambda(\hat{T}_1)} \delta\hat{T}_1}{h^2} + \\ & + \frac{\partial a(\hat{T}_1)}{\partial T} \frac{\hat{T}_2 - \hat{T}_1 - \frac{\alpha_1 h}{\lambda(\hat{T}_1)} \hat{T}_1 + \frac{\alpha_1 h}{h^2 \lambda(\hat{T}_1)} T_{s_1}}{h^2} \delta\hat{T}_1 + \frac{\varepsilon_{pr}(K_{a-v})}{c_{p\text{ eff}}(T_1)\rho_{\text{ eff}}(T_1)} \sigma(T_{\text{IR}}^4 - \hat{T}_1^4 - 4\hat{T}_1^3 \delta\hat{T}_1) K e^{-Kz_1} - q_{v1}, \end{aligned} \quad (2.54)$$

та після перегрупування членів для визначення коефіцієнтів рівняння (2.45)

$$\begin{aligned}
& - \left\{ \frac{1}{\Delta\tau} + \frac{a(\hat{T}_1)}{h^2} \left[1 + \frac{\alpha_1 h}{\lambda(\hat{T}_1)} \right] - \right. \\
& - \frac{\partial a(\hat{T}_1)}{\partial T} \frac{\hat{T}_2 - \hat{T}_1 - \frac{\alpha_1 h}{\lambda(\hat{T}_1)} \hat{T}_1 + \frac{\alpha_1 h}{h^2 \lambda(\hat{T}_1)} T_{s_1}}{h^2} + \\
& \left. + \frac{\varepsilon_{pr}(K_{a-v})}{c_{p\text{eff}}(T_1) \rho_{\text{eff}}(T_1)} \sigma(4\hat{T}_1^3) K e^{-Kz_1} \right\} \delta \hat{T}_1 + \frac{a(\hat{T}_1)}{h^2} \delta \hat{T}_2 = -F_1,
\end{aligned} \tag{2.55}$$

де

$$\begin{aligned}
F_1 = & \frac{T_1 - \hat{T}_1}{\Delta\tau} + a(\hat{T}_1) \frac{\hat{T}_2 - \hat{T}_1 - \frac{\alpha_1 h}{\lambda(\hat{T}_1)} \hat{T}_1 + \frac{\alpha_1 h}{h^2 \lambda(\hat{T}_1)} T_{s_1}}{h^2} + \\
& + \frac{\varepsilon_{pr}(K_{a-v})}{c_{p\text{eff}}(T_1) \rho_{\text{eff}}(T_1)} \sigma(T_{\text{IR}}^4 - \hat{T}_1^4) K e^{-Kz_1} - q_{v1};
\end{aligned} \tag{2.56}$$

$$\begin{aligned}
C_1 = & \frac{1}{\Delta\tau} + \frac{a(\hat{T}_1)}{h^2} \left[1 + \frac{\alpha_1 h}{\lambda(\hat{T}_1)} \right] - \frac{\partial a(\hat{T}_1)}{\partial T} \frac{\hat{T}_2 - \hat{T}_1 - \frac{\alpha_1 h}{\lambda(\hat{T}_1)} \hat{T}_1 + \frac{\alpha_1 h}{h^2 \lambda(\hat{T}_1)} T_{s_1}}{h^2} + \\
& + \frac{\varepsilon_{pr}(K_{a-v})}{c_{p\text{eff}}(T_1) \rho_{\text{eff}}(T_1)} \sigma(4\hat{T}_1^3) K e^{-Kz_1},
\end{aligned} \tag{2.57}$$

$$A_1 = 0, \quad B_1 = \frac{a(\hat{T}_1)}{h^2}; \tag{2.58}$$

– для (2.43) будемо мати:

$$\begin{aligned}
\frac{\hat{T}_i + \delta \hat{T}_i - T_i}{\Delta\tau} = & a(\hat{T}_i) \frac{\hat{T}_{i+1} - 2\hat{T}_i + \hat{T}_{i-1}}{h^2} + a(\hat{T}_i) \frac{\delta \hat{T}_{i+1} - 2\delta \hat{T}_i + \delta \hat{T}_{i-1}}{h^2} + \\
& + \frac{\partial a(\hat{T}_i)}{\partial T} \frac{\hat{T}_{i+1} - 2\hat{T}_i + \hat{T}_{i-1}}{h^2} \delta \hat{T}_i + \frac{\varepsilon_{pr}(K_{a-v})}{c_{p\text{eff}}(T_i) \rho_{\text{eff}}(T_i)} \sigma(T_{\text{IR}}^4 - \hat{T}_i^4) K e^{-Kz_i} - q
\end{aligned} \tag{2.59}$$

$$2 \leq i \leq n-1,$$

та після перегрупування членів для визначення коефіцієнтів рівняння (2.45)

$$\begin{aligned}
& \frac{a(\hat{T}_i)}{h^2} \delta \hat{T}_{i-1} - \left\{ \frac{1}{\Delta\tau} + \frac{2a(\hat{T}_i)}{h^2} - \frac{\partial a(\hat{T}_i)}{\partial T} \frac{\hat{T}_{i+1} - 2\hat{T}_i + \hat{T}_{i-1}}{h^2} \right\} \delta \hat{T}_i + \frac{a(\hat{T}_i)}{h^2} \delta \hat{T}_{i+1} = \\
& = F_i, \quad 2 \leq i \leq n-1,
\end{aligned} \tag{2.60}$$

де

$$F_i = \frac{T_i - \hat{T}_i}{\Delta\tau} + a(\hat{T}_i) \frac{\hat{T}_{i+1} - 2\hat{T}_i + \hat{T}_{i-1}}{h^2} + \frac{\varepsilon_{pr}(K_{a-v})}{c_{p\text{eff}}(T_i) \rho_{\text{eff}}(T_i)} \sigma(T_{\text{IR}}^4 - \hat{T}_1^4) K e^{-Kz_i} - q_{vi},$$

(2.61Д.20)

$$A_i = \frac{a(\hat{T}_i)}{h^2}, \quad (2.62)$$

$$B_i = \frac{a(\hat{T}_i)}{h^2}, \quad (2.63)$$

$$C_i = \frac{1}{\Delta\tau} + \frac{2a(\hat{T}_i)}{h^2} - \frac{\partial a(\hat{T}_i)}{\partial T} \frac{\hat{T}_{i+1} - 2\hat{T}_i + \hat{T}_{i-1}}{h^2}, \quad i = \overline{2, n-1}; \quad (2.64)$$

— для (2.53) будемо мати

$$\begin{aligned} \frac{\hat{T}_n + \delta\hat{T}_n - T_n}{\Delta\tau} &= a(\hat{T}_n) \frac{-\hat{T}_n - \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} \hat{T}_n + \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} T_{s_2} + \hat{T}_{n-1}}{h^2} + \\ &+ a(\hat{T}_n) \frac{-\delta\hat{T}_n - \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} \delta\hat{T}_n + \delta\hat{T}_{n-1}}{h^2} + \\ &+ \frac{\partial a(\hat{T}_n)}{\partial T} \frac{-\hat{T}_n - \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} \hat{T}_n + \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} T_{s_2} + \hat{T}_{n-1}}{h^2} \delta\hat{T}_n + \\ &+ \frac{\varepsilon_{pr}(K_{a-v})}{c_{p\text{eff}}(T_n) \rho_{\text{eff}}(T_n)} \sigma(T_{\text{IR}}^4 - \hat{T}_1^4) K e^{-Kz_n} - q_{vn}, \end{aligned} \quad (2.65)$$

та після перегрупування членів для визначення коефіцієнтів рівняння (2.45)

$$\begin{aligned} &\frac{a(\hat{T}_n)}{h^2} \delta\hat{T}_{n-1} - \\ &- \left\{ \frac{1}{\Delta\tau} + \frac{a(\hat{T}_n)}{h^2} \left[1 + \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} \right] + \frac{\partial a(\hat{T}_n)}{\partial T} \frac{-\hat{T}_n - \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} \hat{T}_n + \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} T_{s_2} + \hat{T}_{n-1}}{h^2} \right\} \delta\hat{T}_n = \\ &= -F_n, \end{aligned} \quad (2.66)$$

де

$$F_n = \frac{T_n - \hat{T}_n}{\Delta\tau} + a(\hat{T}_n) \frac{-\hat{T}_n - \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} \hat{T}_n + \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} T_{s_2} + \hat{T}_{n-1}}{h^2} +$$

$$+ \frac{\varepsilon_{pr}(K_{a-v})}{c_{p\text{eff}}(T_n) \rho_{\text{eff}}(T_n)} \sigma(T_{\text{IR}}^4 - \hat{T}_1^4) K e^{-Kz_n} - q_{vn}, \quad (2.69)$$

$$A_n = \frac{a(\hat{T}_n)}{h^2}, B_n = 0, \quad (2.68)$$

$$C_n = \frac{1}{\Delta\tau} + \frac{a(\hat{T}_n)}{h^2} \left[1 + \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} \right] + \frac{\partial a(\hat{T}_n)}{\partial T} \frac{-\hat{T}_n - \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} \hat{T}_n + \frac{\alpha_2 h}{\lambda(\hat{T}_n)} T_{s_2} + \hat{T}_{n-1}}{h^2}$$

(2.69Д.28)

У лінеаризованих рівняннях (2.55), (2.60), (2.66) вектор $\delta\hat{T}_i, i = \overline{1, n}$, К є нев'язкою під час ітераційного розв'язання системи нелінійних дискретних рівнянь виду (2.45) на кожному кроці інтегрування за часом.

Тоді розподіл температури на кожному кроці інтегрування за часом визначається за формулою

$$\hat{T}_i^{k+1} = \hat{T}_i^k + \delta\hat{T}_i^k, i = 1, n, \quad (2.70)$$

де k – номер ітерації на кожному кроці інтегрування за часом.

Умова закінчення ітераційного процесу на кожному кроці інтегрування за часом має вигляд

$$|\delta\hat{T}_i| < \varepsilon_T, i = 1, n, \quad (2.71)$$

де ε_T – похибка вимірювання температури, К.

За числовою методикою (2.43)–(2.71) розроблено спеціалізоване програмне забезпечення на мові програмування Mathcad [20].

Розроблено алгоритм розрахунку процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання, описаний нижче за текстом. Схема алгоритму показана на рисунку 2.8.

Вихідними даними для розрахунку є:

- спосіб сушіння (радіаційний, радіаційно-конвективний, радіаційно-кондуктивний, поєднання радіаційного, конвективного та кондуктивного);
- умови теплообміну флютингу з навколишнім середовищем (вільна або вимушена конвекція);
- параметри флютингу (початкова температура на вході в сушильну частину, маса квадратного метру, товщина, теплофізичні властивості, перший критичний вологовміст);
- параметри ПРМ (продуктивність, ширина полотна флютингу, конструктивне обмеження довжини зони сушіння);
- крок розрахунку по товщині флютингу;
- температура конвективного теплоносія;
- тип конвекції (якщо конвекція вимушена, то вказується швидкість руху газоподібного теплоносія);
- мета розрахунку (довжина зони сушіння для досягнення заданого вологовмісту або час сушіння та вологовміст за відомою довжиною зони сушіння (при обох розрахунках вказується обмеження по допустимій температурі);
- температура поверхні ІЧ випромінювачів.

Крім того, якщо наявна кондуктивна складова підводу теплоти, то вказується густина теплового потоку від сушильних циліндрів до флютингу.

Ці дані вводяться у блоці 2.

У блоці 3 задаються початкові значення температур у вузлових точках. Початковий момент часу задається рівним 0 с.

В блоці 4 визначаються координати вузлових точок та поточне значення часу.

Значення теплофізичних властивостей газоподібного теплоносія в зоні сушіння та ефективні значення теплофізичних властивостей вологого флютингу у вузлових точках визначаються в блоках 5 та 6.

Далі в блоках 7-8 або 7-9 відбувається визначення критеріального рівняння, що описує теплообмін поверхонь флютингу з навколишнім

середовищем в залежності від типу конвекції.

Коефіцієнти тепловіддачі випромінювання та конвекції розраховуються в блоці 10.

Далі визначається поточна довжина зони дії ІЧВ на флютинг (блок 11).

Умова з блоку 12 визначає, чи досягла довжина зони сушіння або поточний вологовміст необхідного значення, вказаних у вихідних даних. При досягненні необхідних значень розрахунок переходить на вивід даних та кінець в блоках 20 та 21.

В блоці 13 середнє поточне значення вологовмісту порівнюється з першим критичним. При сушінні в першому періоді (вологовміст більший критичного) подальший розрахунок коефіцієнту вологообміну ведеться в блоці 14, в іншому випадку (другий період сушіння, вологовміст менший критичного) – в блоці 18.

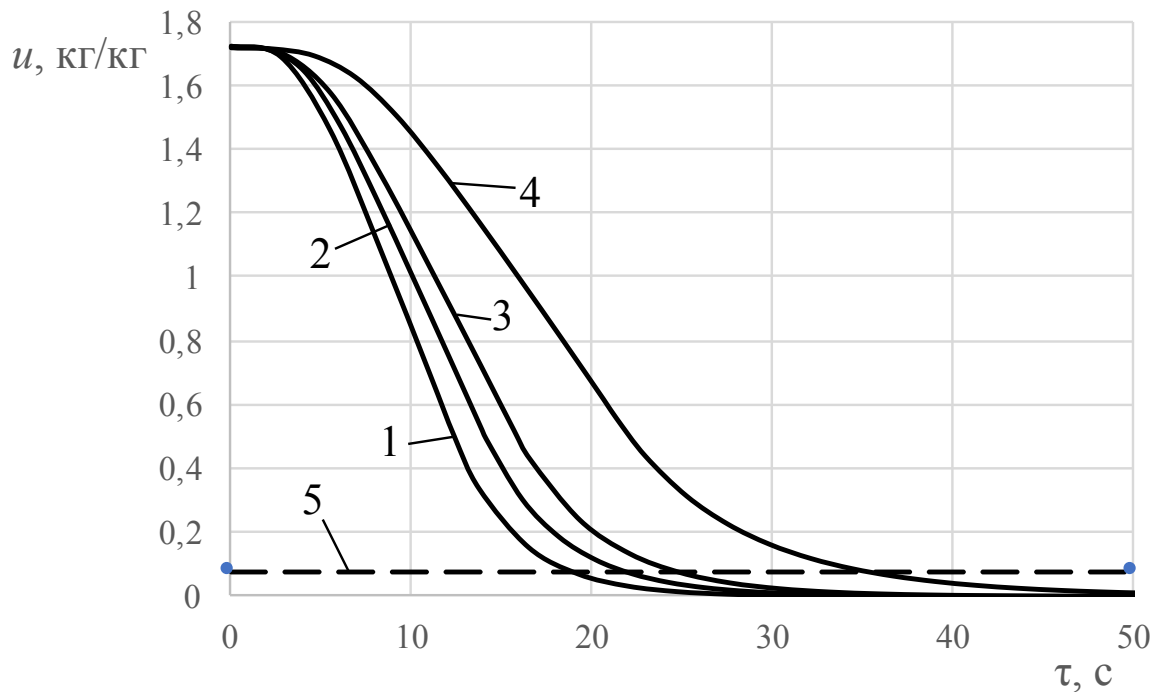
Якщо поточний вологовміст менше критичного його порівнюють із заданим в блоці 19. Якщо вологовміст досягнув кінцевого можливого значення, то розрахунок закінчується, виводяться значення поточного часу сушіння, вологовмісту та довжини зони сушіння (блоки 20, 21). В іншому випадку (поточний вологовміст більший рівноважного), а також при розрахунку в блоці 14, програма переходить в блок 15.

Блок 15 розраховує за формулами з системи рівнянь (2.29) поточні значення температури та вологовмісту у вузлових точках по товщині флютингу. Потім в блоках 16-17 відбувається переіндексація значень температури та вологовмісту у вузлових точках флютингу за часом, і розрахунок повертається до блоку 4.

Умовою закінчення розрахунку є досягнення заданого вологовмісту або заданого часу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ.

2.3 Результати числового моделювання та їх аналіз

Графічні залежності розрахункових значень вологовмісту від часу сушіння флютинга з масами квадратного метру 112 г/м^2 , 125 г/м^2 , 140 г/м^2 та 200 г/м^2 при початковому вологовмісті $1,72 \text{ кг/кг}$ та густині теплового потоку 35 кВт/м^2 показано на рисунку 2.9.



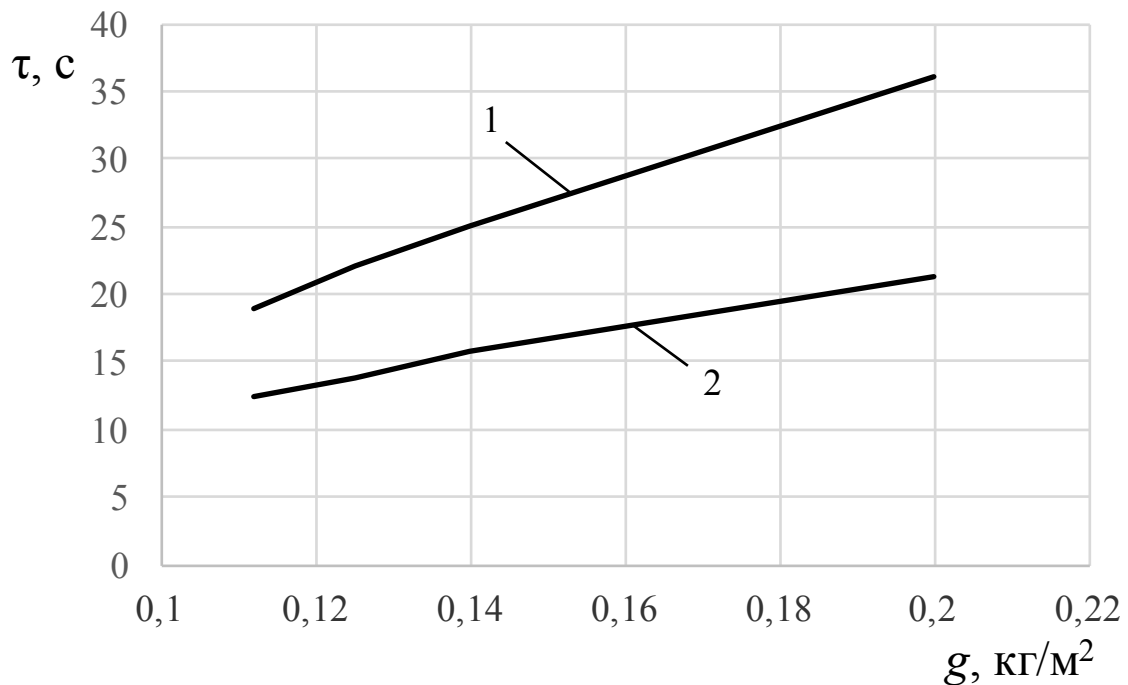
1 – $g=112 \text{ г/м}^2$; 2 – $g=125 \text{ г/м}^2$;

3 – $g=140 \text{ г/м}^2$; 4 – $g=200 \text{ г/м}^2$; 5 – $u=0,075 \text{ кг/кг}$

Рисунок 2.9 – Залежність вологовмісту від часу сушіння за $q=35 \text{ кВт/м}^2$

За густини теплового потоку 35 кВт/м^2 тривалість сушіння флютинга масою квадратного метру 112, 125, 140 та 200 г/м^2 до нормативної сухості 93% ($0,075 \text{ кг/кг}$) становить 19, 22, 25 та 36 с відповідно. Час сушіння флютинга від початку цього процесу до кінця першого періоду сушіння для флютингу вказаних питомих мас становить 12,4, 13,9, 15,7 та 21,3 с відповідно.

Залежність часу сушіння від маси квадратного метру флютингу згідно рисунку 2.9 показано на рисунку 2.10.



1 – час сушіння до кінцевої сухості 93%;

2 – час сушіння першого періоду від початку сушіння;

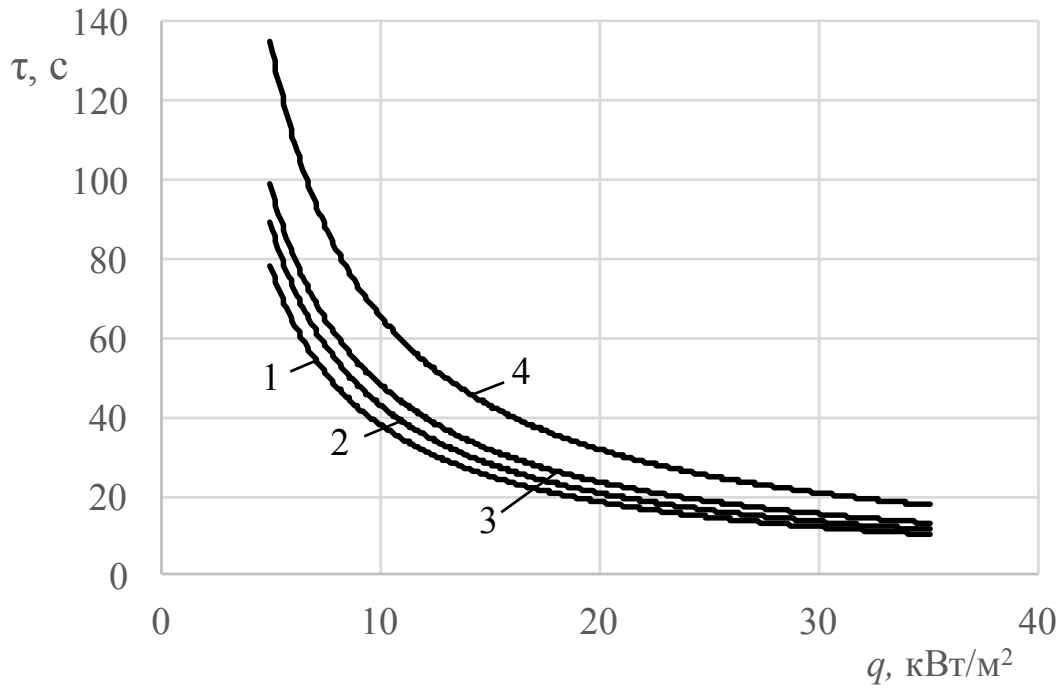
Рисунок 2.10 – Залежність часу сушіння від маси квадратного метру флютингу за $q=35$ кВт/м²

Інтенсивність процесу сушіння флютингу під час застосування енергії ІЧВ найвища в першому періоді сушіння (постійної швидкості). Тому застосування ІЧВ для сушіння флютингу найбільш доцільне для нагрівання та першого періоду сушіння.

Залежність часу сушіння флютингу до кінця першого періоду від густини теплового потоку за різних мас квадратного метру флютингу зображено на рисунку 2.11.

Як видно з рисунку 2.11, збільшення густини теплового потоку від проходження ІЧВ непропорційне зменшенню часу сушіння першого періоду. Коефіцієнт використання теплоти від ІЧВ зменшується.

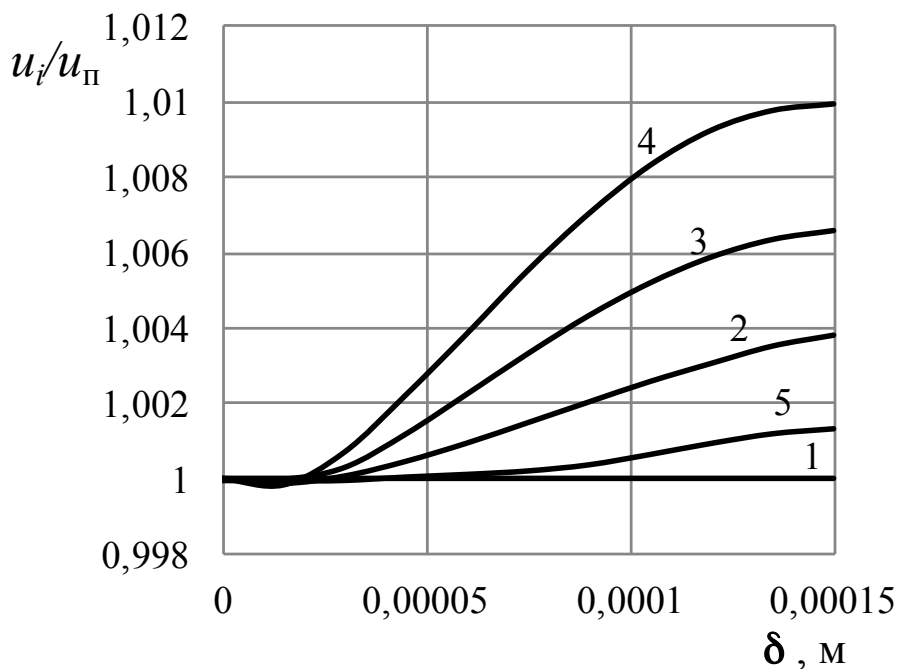
За збільшення маси квадратного метру флютингу час сушіння до кінця першого періоду зростає, що зумовлено кількістю води у флютингу і, відповідно, необхідної кількості теплоти.



1 – 112 г/м²; 2 – 125 г/м²; 3 – 140 г/м²; 4 – 200 г/м²

Рисунок 2.11 – Залежність часу першого періоду сушіння флютингу від густини теплового потоку при різній масі квадратного метру

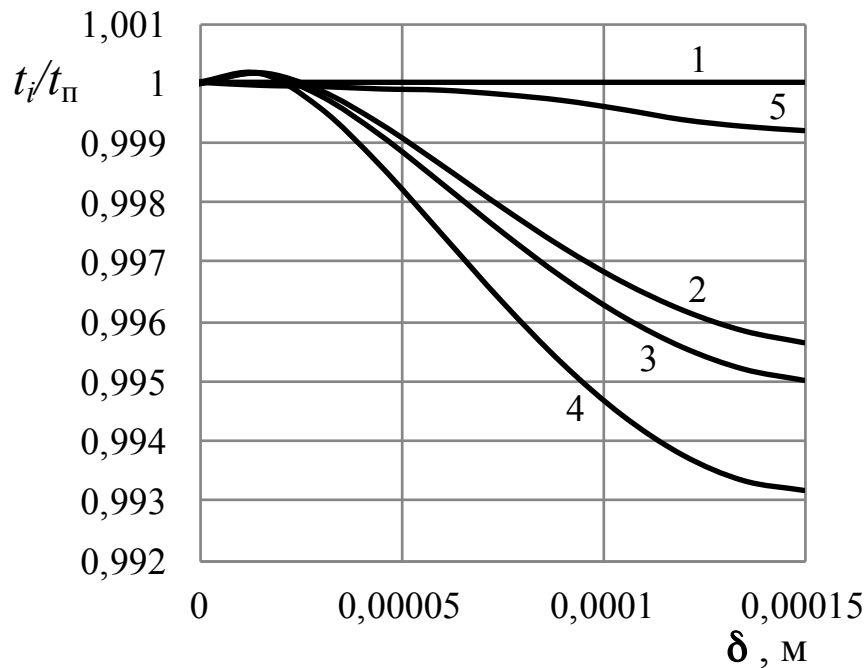
За результатами розрахунку математичної моделі встановлено як змінюється вологовміст та температура по товщині флютингу під час сушіння за густини теплового потоку 35 кВт/м². Залежність відносного вологовмісту по товщині флютингу від часу сушіння зображено на рисунку 2.12.



1 – 0 с; 2 – 3 с;
3 – 6 с; 4 – 12 с;
5 – 20 с

Рисунок 2.12 – Зміна відносного вологовмісту по товщині флютингу під час сушіння

Залежність відносної температури по товщині флютингу від часу сушіння зображено на рисунку 2.13.



1 – 0 с; 2 – 3 с; 3 – 6 с; 4 – 12 с; 5 – 20 с

Рисунок 2.13 –
Зміна відносної
температури по
товщині флютингу
під час сушіння

Залежності відносного вологовмісту $u_i/u_{\text{п}}$ від товщини (рисунок 2.12) вказують на наявність градієнта вологовмісту по товщині флютингу (де u_i – значення вологовмісту по товщині, $u_{\text{п}}$ – значення вологовмісту на ближній до ІЧ випромінювача поверхні). За даними числового аналізу графічних залежностей перепад вологовмісту на обох поверхнях флютингу становить до 0,0015 кг/кг, зростаючи під час сушіння та під час збільшення густини теплового потоку. За маси квадратного метру флютингу 200 г/м² та 112 г/м² градієнт за вологовмістом становить 5,2 кг/(кг·м) та 11 кг/(кг·м) відповідно. Незначний перепад за вологовмістом пояснюється випаровуванням води по всій товщині паперу за температури більше 100 °С та низьким опором перенесенню води та пари всередині флютингу. Вологовміст в поверхневому шарі дещо менший за вологовміст на поверхні через наявність теплових втрат з поверхні тепловіддачею.

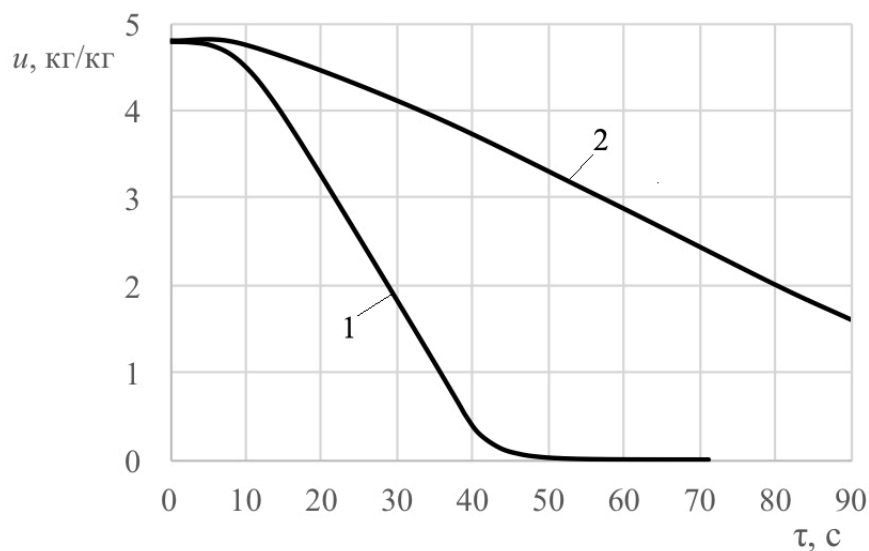
Залежності відносної температури $t_i/t_{\text{п}}$ від товщини (рисунок 2.13) вказують на наявність градієнта температури по товщині флютингу (де t_i – значення температури по товщині, $t_{\text{п}}$ – значення температури на ближній до ІЧ випромінювача поверхні). За існуючого перепаду температур на поверхнях

флютингу в $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ градієнт температури по товщині становить від 6935 K/м до 14641 K/м за маси квадратного метру 200 г/м^2 та 112 г/м^2 відповідно. Незначний перепад температури пояснюється малою товщиною паперу та достатньо високим ступенем поглинання ІЧВ по товщині флютингу. Температура в поверхневому шарі дещо вища температури на поверхні через наявність теплових втрат з поверхні завдяки тепловіддачі.

Наприкінці процесу сушіння градієнт за вологовмістом по товщині флютингу прямує до нуля. Градієнт температури зменшується, досягаючи постійного значення.

Результати числового моделювання процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ порівняно з даними контактного способу на сушильних циліндрах (рисунок 2.14). Так, за однакових густин теплових потоків (близько 35 кВт/м^2) час сушіння паперу масою 112 г/м^2 зменшився:

- а) час періоду нагрівання скоротився в 2,1 раз;
- б) час сушіння до 50 % від початкового вологовмісту зменшився в 2,7 рази;
- в) час сушіння до 33% від початкового вологовмісту зменшився втричі.



1 – радіаційний спосіб сушіння; 2 – контактний спосіб сушіння

Рисунок 2.14 – Порівняння кривих сушіння за радіаційним та контактним способами сушіння

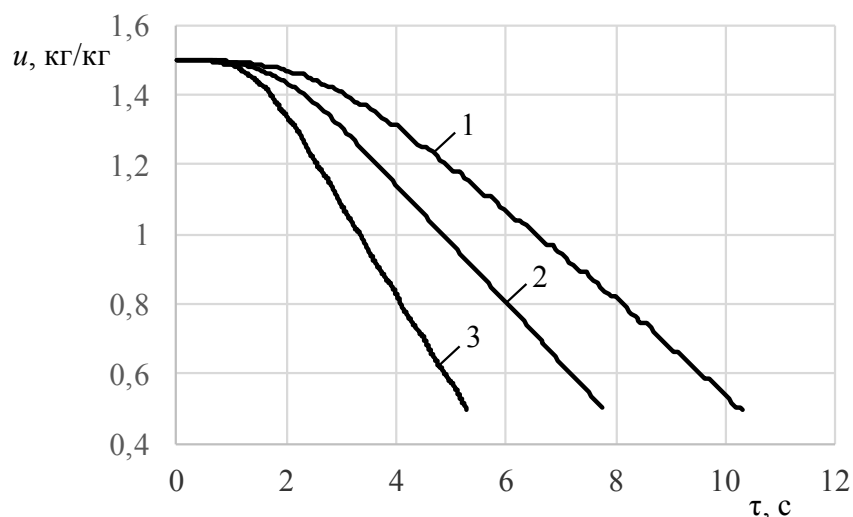
За вказаних умов за контактного способу сушіння швидкість процесу в першому періоді становить $0,043\text{ кг/кг}\cdot\text{с}$, а за радіаційного – $0,144\text{ кг/кг}\cdot\text{с}$, що

більше в 3,3 раз.

Температура флютингу за радіаційного способу в першому періоді сушіння не перевищувала 150 °С, а за контактного способу складала близько 95 °С.

Таким чином можна стверджувати, що сушіння флютингу із застосуванням ІЧВ в порівнянні з контактним за однакових теплових потоків є більш інтенсивним. Проте через вищі температурні режими радіаційне сушіння є більш жорстким. Це зумовлює необхідність шляхом числового моделювання цього процесу визначати температури флютингу під час сушіння та надавати рекомендації щодо застосування ІЧВ.

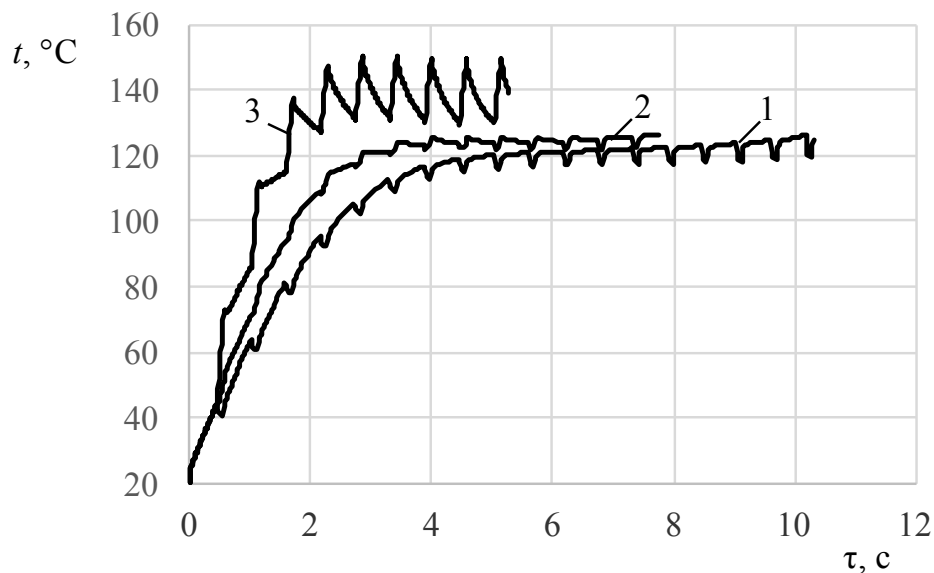
Результати числового моделювання процесу сушіння флютингу радіаційним способом за допомогою ІЧ випромінювачів (рисунок 2.15) порівняно з даними моделювання радіаційно-кондуктивного способу сушіння на сушильних циліндрах в поєднанні з ІЧ випромінювачами (рисунок 2.16). Густина теплового потоку від інфрачервоного випромінювання на поверхні флютингу становить 35 кВт/м² та 105 кВт/м², а від поверхні сушильних циліндрів – 35 кВт/м².



1 – без ІЧ випромінювачів; 2 – з ІЧ випромінювачами, 35 кВт/м²;

3 – з ІЧ випромінювачами, 105 кВт/м²

Рисунок 2.15 – Залежність вологовмісту від часу сушіння (криві сушіння) за радіаційного способу сушіння флютингу



1 – без ІЧ випромінювачів; 2 – з ІЧ випромінювачами, 35 кВт/м²;

3 – з ІЧ випромінювачами, 105 кВт/м²

Рисунок 2.16 – Залежність температури поверхні флютингу від часу сушіння за радіаційно-кондуктивного способу сушіння флютингу

Встановлено, що за комбінованого способу сушіння (наприклад, під час монтажу інфрачервоних випромінювачів на вільному пробігу полотна флютингу між сушильними циліндрами) тривалість процесу в порівнянні з контактним способом зменшується завдяки додатковому джерелу теплоти (ІЧВ): за густини теплового потоку 35 кВт/м² (як і від сушильних циліндрів) – на 24% (з 10,3 с до 7,8 с), за густини теплового потоку 100 кВт/м² – на 49 % (з 10,3 с до 5,3 с) (рисунок 2.16).

Температура поверхні флютингу (рисунок 2.16) під час сушіння на сушильних циліндрах у кінці першого періоду становить 125 °С, при встановленні ІЧ випромінювачів за густини теплового потоку 35 кВт/м² – 126 °С, а за густини теплового потоку 100 кВт/м² – 139 °С з піковим значенням близько 150 °С.

Таким чином, під час комбінованого сушіння флютингу з періодичним впливом ІЧВ збільшення потужності випромінювачів зменшує часу сушіння. Проте потужність випромінювачів обмежена критичним значенням температури флютингу 140-150°С [77, 117].

2.4 Висновки

Згідно проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Сформульовано основні положення фізичної моделі процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ.
2. Обґрунтовано механізм перенесення вологи всередині флютингу та назовні за наявності внутрішнього джерела теплоти (ІЧВ).
3. Складена математична модель процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ на основі спрощеної моделі РКТ та законів Стефана-Больцмана та Бугера.
4. Встановлено, що за однакових теплових потоків час сушіння флютингу радіаційним способом менший, ніж за кондуктивного на сушильних циліндрах.
5. Визначено, що встановлення ІЧ випромінювачів на вільних пробігах полотна флютингу між сушильними циліндрами зменшує загальний час сушіння: на 24% (за густини теплового потоку від ІЧ випромінювачів 35 кВт/м^2) та на 49 % (за густини теплового потоку від ІЧ випромінювачів 100 кВт/м^2).

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ФЛЮТИНГУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕНЕРГІЇ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

3.1 Мета і завдання експериментальних досліджень

Мета досліджень – експериментальна перевірка адекватності розробленої математичної моделі процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання, а також підтвердження доцільності застосування ІЧВ для сушіння флютингу.

Флютинг висушують до вологості, що відповідно до ДСТУ 7377-85 становить $7^{+2}_{-1}\%$ [70]. Надлишкова кінцева волога, як і сухість, може спричинити погіршення якісних показників флютингу.

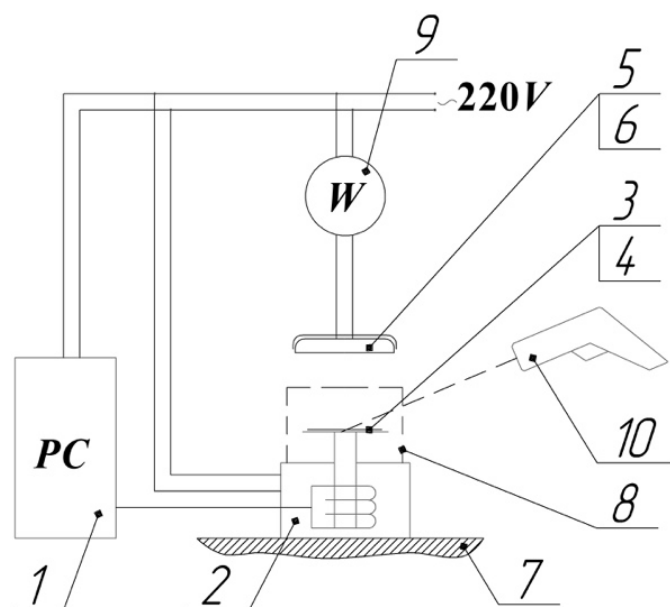
Максимальне значення температури флютингу під час сушіння в ДСТУ не вказано. Проте високотемпературний режим сушіння може погіршити фізико-механічні характеристики флютингу, які зазначено в ДСТУ 7377-85. Рекомендоване максимальне значення температури флютингу має не перевищувати 140-150°C [72, 77, 117].

Розрахований час сушіння дозволяє визначити довжину зони проходження полотна флютингу в сушильній частині ПРМ.

Згідно математичного описання процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ (розділ 2) для перевірки адекватності математичної моделі обрано такі параметри: вологовміст, температура та час.

3.2 Опис експериментальної установки та методики дослідження

Експериментальна установка, схему якої показано на рисунку 3.1, призначена для дослідження кінетичних закономірностей процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ.



1 – персональний комп'ютер; 2 – електронні ваги; 3 – зразок флютингу; 4 – платформа вагів; 5 – ІЧ випромінювач; 6 – рефлектор; 7 – вібростійка поверхня; 8 – вітрозахисний кожух; 9 – ватметр; 10 – пірометр

Рисунок 3.1 – Експериментальна установка для дослідження кінетики сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ

Фото експериментальної установки показано на рисунку 3.2.



1 – персональний комп'ютер;
2 – електронні ваги;
3 – зразок флютингу;
4 – ІЧ випромінювач;
5 – пірометр

Рисунок 3.2 – Фото експериментальної установки

Експериментальна установка [18, 85, 97] дозволяє вимірювати такі параметри: масу флютингу, час сушіння, температуру поверхні флютингу, електричну потужність ІЧ випромінювача.

За джерело випромінювання використано керамічний електричний ІЧ випромінювач типу ЕСН4 номінальною потужністю 1 кВт (рисунок 3.3) [95]. Робоча поверхня ІЧ випромінювача розміром 0,122×0,122 м має температуру робочої поверхні 560-600 °С. Довжина хвиль, що генерується робочою поверхнею інфрачервоного випромінювача, складає 3,3–3,7 мкм. Дійсна

електрична потужність, що споживає випромінювач, вимірювалась ватметром з максимальною похибкою 6 Вт.

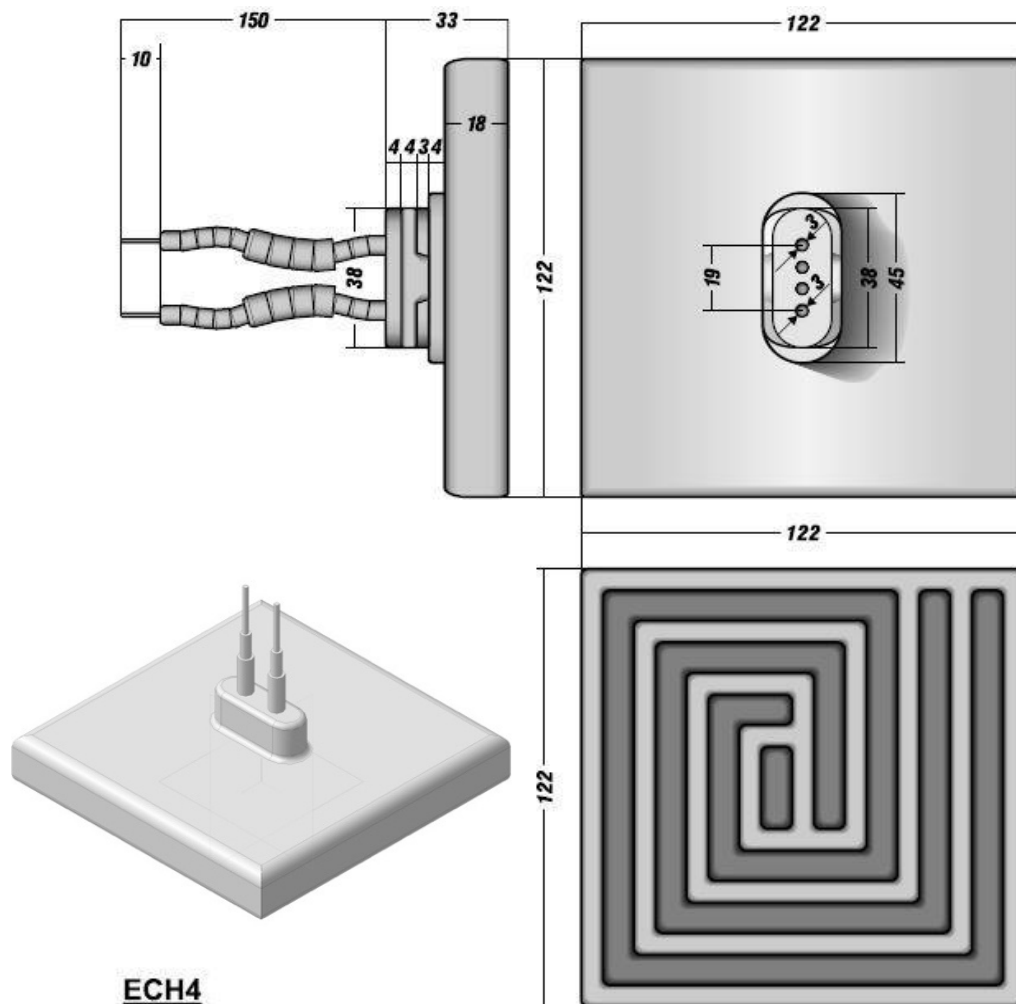
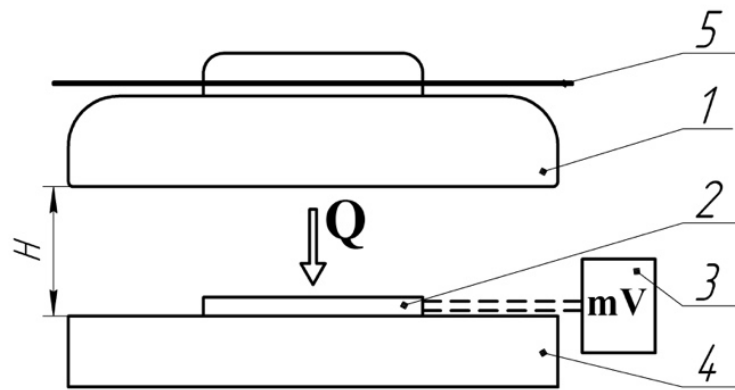


Рисунок 3.3 – Електричний керамічний ІЧ випромінювач ЕСН4

Величина густини променевого теплового потоку від робочої поверхні випромінювача до поверхні флютингу регулювалась зміною відстані між ними шляхом підняття випромінювача на штативі. Відстань між поверхнями вимірювалась за допомогою штангенциркуля.

Для експериментального визначення густини теплового потоку від інфрачервоного випромінювача до поверхні флютингу використано датчик теплового потоку ПТП-04т з похибкою вимірювання 10 Вт/м^2 .

Схему вимірювання густини променевого теплового потоку від ІЧ випромінювача до поверхні флютингу наведено на рисунку 3.4.



1 – ІЧ випромінювач; 2 – датчик теплового потоку;

3 – мілівольтметр; 4 – підтримуюча платформа; 5 – рефлексор

Рисунок 3.4 – Схема вимірювання густини променевого теплового потоку

Вольтметр, підключений до датчика теплового потоку, вимірює ЕРС. Перехід від значення ЕРС до густини променевого теплового потоку визначається залежністю:

$$q = \text{ЕРС} \cdot k, \quad (3.1)$$

де k – перевідний коефіцієнт, $k = 71,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{В})$.

Номінальна електрична потужність ІЧ випромінювача є паспортною величиною і становить 1 кВт. Сумарне значення електричної потужності вимірювалось ватметром.

Теплофізичні характеристики оточуючого флютингу середовища (повітря) вимірювались такими приладами: вологість – лабораторним гігрометром психрометричним, а температура – лабораторним термометром. Товщину флютингу визначали мікрометром часового типу.

Зразок флютингу під час дослідів розміщувався на платформі з сітчастою поверхнею. Платформа встановлювалась на електронні ваги. Для зменшення похибок вимірювання ваги розміщувалися на вібростійкій поверхні, а навколо платформи був встановлений вітрозахисний кожух. Максимальна похибка вимірювання маси становила 3 мг. Персональний комп'ютер з частотою 3 Гц

зчитував з вагів поточне значення маси вологого флютингу. Значення часу сушіння та маси зразка фіксувалися на комп'ютері.

Температура верхньої поверхні флютингу вимірювались пірометром. Для зменшення вірогідності раптової похибки вимірювання температури пірометр фіксувався на штативі. Вимірювання температури поверхні виконувались пірометром кожні 5 с, інтервал замірів визначався за допомогою секундоміра.

Під час дослідів теплота від зразка флютингу надходить в оточуюче середовище тепловіддачею за умов конвекції. В ПРМ при русі полотна флютингу відбувається незначний обдув його поверхні потоком повітря. Проте в працях [15] показано, що зміна інтенсивності тепловіддачі та збільшення вологості повітря над поверхнею флютингу не мають суттєвого впливу на процес сушіння. Тому похибка від статично розміщеного зразку флютингу без руху теплоносія над його поверхнею була незначною.

3.3 Контрольовані фізичні величини і засоби їх вимірювання

Під час створення експериментальної установки та розробки методики експериментальних досліджень процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання було поставлено завдання передбачити можливість змінення і контролювання параметрів сушіння флютингу з необхідною точністю, а також забезпечення відтворюваності експерименту.

В основу вибору методів вимірювань величин і класів точності приладів було покладено їх відносну похибку [75]. Для досягнення поставленого завдання на основі аналізу особливостей процесу сушіння встановлено необхідність контролювати такі параметри:

- 1) масу флютингу за допомогою електронних прецизійних вагів Kern 440-21A (діапазон вимірювання від 0 до 60 г; дискретність 1 мг; похибка вимірювання 3 мг, частота вимірювання 3 Гц);
- 2) температуру поверхні флютингу за допомогою пірометра TN425LE

(діапазоном вимірювання від мінус 60 до +1000 °С, дискретність 1 °С, похибка вимірювання 2 °С);

3) електричну потужність інфрачервоного випромінювача за допомогою ватметра Д50162 з класом точності 0,2 згідно з ГОСТ 8711-78 (діапазон вимірювання 75 – 3000 Вт);

4) напругу в датчику теплового потоку ПТП-04т за допомогою лабораторного вольтметра Э59/1 за ГОСТ 8711-60 з класом точності 0,5 (діапазон вимірювання 75В – 150В – 300В – 600В, ціна поділки 0,5 – 1 – 2 – 4 В, відповідно);

5) вологість повітря за допомогою лабораторного гігрометра психрометричного ВИТ-2 з ціною поділки по сухому та мокрому термометрам 0,2 °С і діапазоном вимірювання 15 – 40 °С та визначенням відносної вологості в межах 20 – 93 % з дискретністю в 1 %;

6) температуру повітря за допомогою лабораторного термометра (діапазон вимірювання 0 – 50 °С, ціна поділки 0,4 °С);

7) товщину флютингу за допомогою мікрометра часового типу за ГОСТ 577-68 (ціна поділки шкали 0,01 мм, діапазоном вимірювання 0 – 25 мм);

8) відстань між робочою поверхнею інфрачервоного випромінювача та поверхнею паперу за допомогою штангенциркуля типу ШЦ-1 ДСТУ ГОСТ 166:2009 з класом точності 1 (діапазон вимірювання 0 – 150 мм, ціна поділки 0,01мм, похибка вимірювання 0,05 мм).

Аналіз похибок, що мали місце під час проведення експериментальних досліджень, і результати оцінювання відносних похибок засвідчили, що використані вимірювальні прилади дають можливість провести заміри величин у потрібних діапазонах з необхідною точністю (додаток Г).

3.4 Флютинг для дослідження

Флютинг виготовляється переважно з суміші макулатури та небіленої сульфатної целюлози в різному співвідношенні. Додавання сульфатної целюлози

надає флютингу кращих фізико-механічних властивостей.

Для виявлення кінетичних закономірностей сушіння флютингу з різною масою квадратного метру вирішено досліджувати зразки флютингу поширеної марки Б-1 з густиною квадратного метру 112, 125 та 140 г/м² згідно ДСТУ 7377-85, а також зразки з нестандартного флютингу зі збільшеною масою квадратного метру 200 г/м². Флютинг для дослідження виготовлено на ПрАТ "Київський картонно-паперовий комбінат".

3.5 Дослідження процесу сушіння флютингу

Для визначення вологовмісту дослідні зразки маркуються, висушуються в сушильній шафі до постійної маси та зважуються на прецизійних вагах. Після цього висушені зразки замочуються протягом визначеного часу та витримуються в ексикаторі протягом доби для рівномірного розподілу вологи всередині. Час замочування підбирається методом підбору, критерій якого – рівномірна по всій товщині вологість, що становить близько 60%, (як, здебільшого, перед сушильною частиною ПРМ). За даних умов час замочування складає 3 доби. Замочені зразки витримуються в ексикаторі.

Перед початком сушіння інфрачервоний випромінювач піднімається над зразком флютингу на певну висоту, значення якої вимірюється штангенциркулем. Після цього положення випромінювача фіксується кріпленням штативу. Відстань між випромінювачем та флютингом визначається завчасно методом підбору, критерій якого є отримання необхідної густини променевого теплового потоку на верхній поверхні флютингу.

Інфрачервоний випромінювач включається завчасно для повного розігріву, враховуючи його інерційні характеристики [43].

Час нагрівання ІЧ випромінювача визначається з графічної залежності (рисунок 3.5) за отриманими дослідними даними (додаток А).

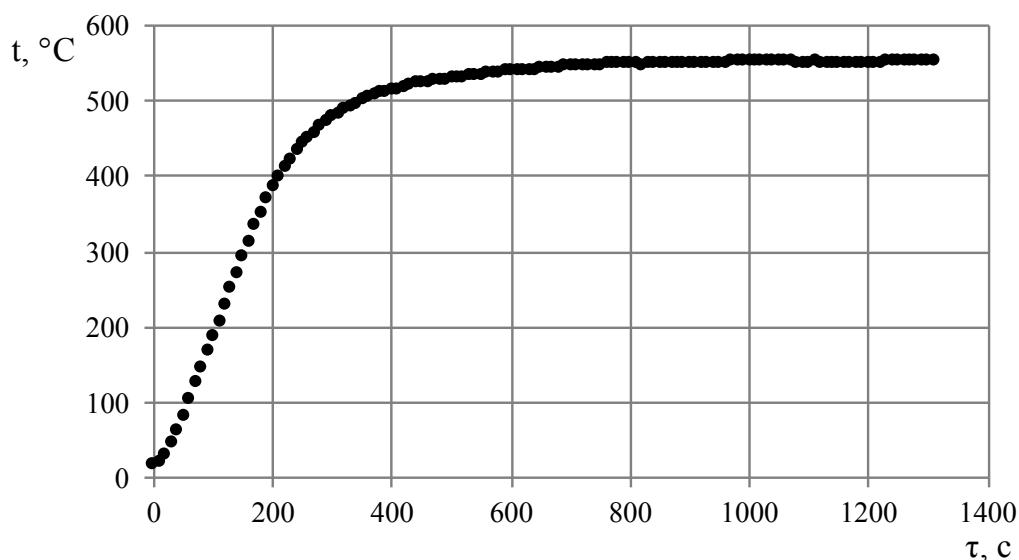


Рисунок 3.5 – Залежність температури поверхні ІЧ випромінювача від часу

Як видно з рисунку 3.5, час повного нагріву експериментального ІЧ випромінювача становить майже 800 с.

Після повного розігріву ІЧ випромінювача за ватметром визначається електрична потужність, яку споживає випромінювач.

З ексикатора замочений зразок флютингу розміщується та фіксується на сітчастій платформі.

Записуються показання температури та вологості повітря в зоні сушіння та початкової температури поверхні флютингу.

Вимірювання маси зразка починається з запуском роботи програми, що контролює потік даних між вагами та комп'ютером. Під час проведення експериментів використано програму Kern Balance Connection. Початок вимірювання та запису показань маси починається після вилучення між випромінювачем та зразком флютингу термозахисного екрану. Одночасно за секундоміром починається відлік часу для фіксації значень температури поверхні флютингу за допомогою пірометра.

Вимірювання показань маси, температури та часу продовжуються до кінця процесу сушіння флютингу (в кінці сушіння значення маси зразку не змінюються або коливаються в межах похибки вимірювання вагів).

Для зміни густини теплового потоку від інфрачервоного випромінювача до флютингу необхідно змінити відстань між ними.

Втрати теплоти з поверхні зразка флютингу в оточуюче середовище відбувається за умов вільної конвекції.

3.5.1 Дослідження впливу густини теплового потоку на кінетику сушіння

Експериментальні дослідження для визначення впливу величини густини променевого теплового потоку проводились на зразках флютингу марки Б-1 з масою квадратного метру 125 г/м^2 .

Узагальнені результати експериментів наведено у вигляді графічних залежностей вологовмісту флютингу від часу сушіння $u=f(\tau)$ (криві сушіння), температури поверхні флютингу від часу сушіння $t=f(\tau)$ та швидкості сушіння від вологовмісту $du/d\tau=f(u)$ [19, 89, 90, 91].

Для зручності порівняння разом з експериментальними даними на графіках нанесені результати розрахунку за математичною моделлю, наведеною в розділі 2.

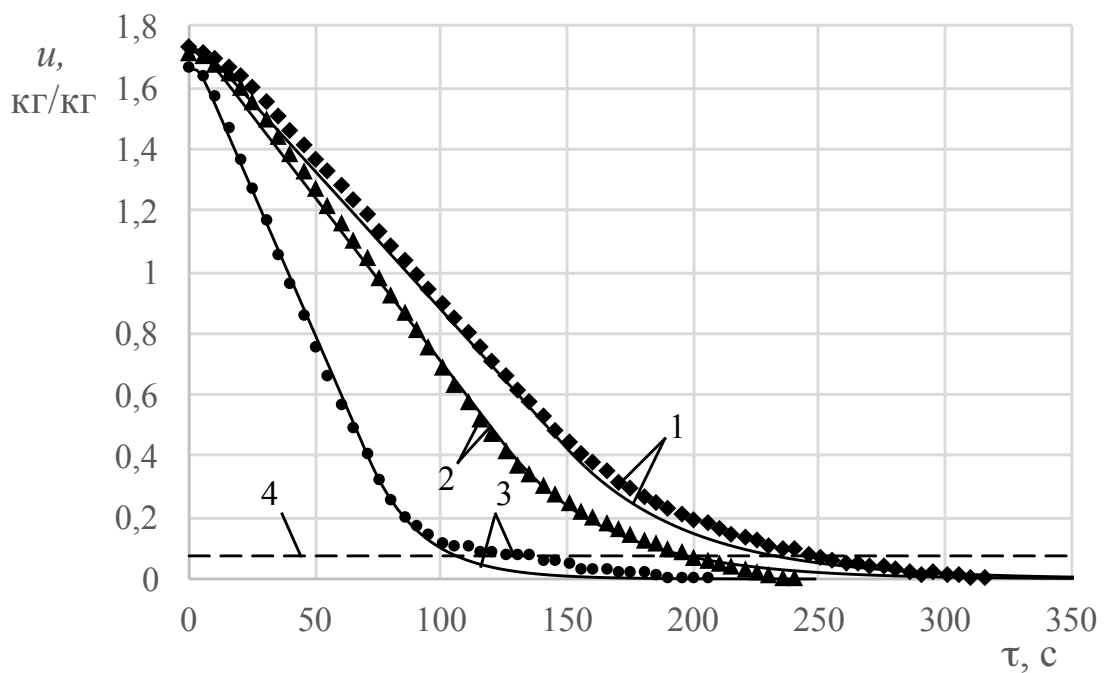
Результати експериментів наведено в додатку Б. Основні числові дані експериментів наведено в таблиці 3.1.

Результати обробки експериментальних даних у вигляді кривих сушіння показано на рисунку 3.6.

Згідно результатів експериментів, сушіння флютингу до вологовмісту меншого за $0,075 \text{ кг/кг}$ є недоцільним через суттєве збільшення тривалості сушіння та можливого погіршення фізичних характеристик флютингу в результаті перегріву.

Таблиця 3.1 – Результати експерименту

Густина теплового потоку, Вт/м ²	Швидкість сушіння в першому періоді, кг/кг·с	Тривалість першого періоду сушіння, с	Середня температура поверхні флютингу в першому періоді, °С	Температура поверхні флютингу, °С		Загальний час сушіння (до $u=0$ кг/кг), с	
				$u=0,075$ кг/кг	$u=0$ кг/кг	до $u=0,075$ кг/кг	до $u=0$ кг/кг
3665	0,009	144	66	155	161	250	318
4300	0,012	116	69	182	187	200	244
6835	0,018	64	87	210	217	130	203



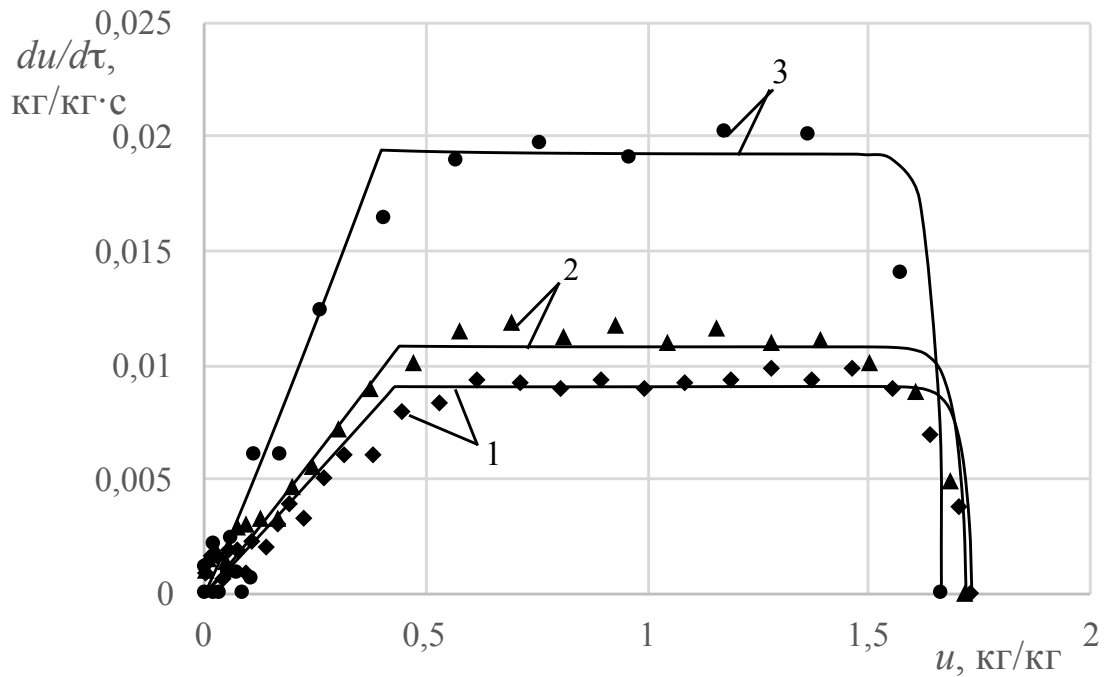
1 – $q=3665$ Вт/м²; 2 – $q=4300$ Вт/м²; 3 – $q=6835$ Вт/м²; 4 – $u=0,075$ кг/кг;

◆, ▲, ● – експериментальні дані; — – теоретичні дані

Рисунок 3.6 – Криві сушіння флютингу ($g=125$ г/м²) за різних густин теплових потоків

Залежність швидкості сушіння флютингу від вологовмісту показано на рисунку 3.7.

З рисунку 3.7 видно, що інтенсивність сушіння в першому періоді збільшується зі збільшенням густини променевого теплового потоку. Очевидно,



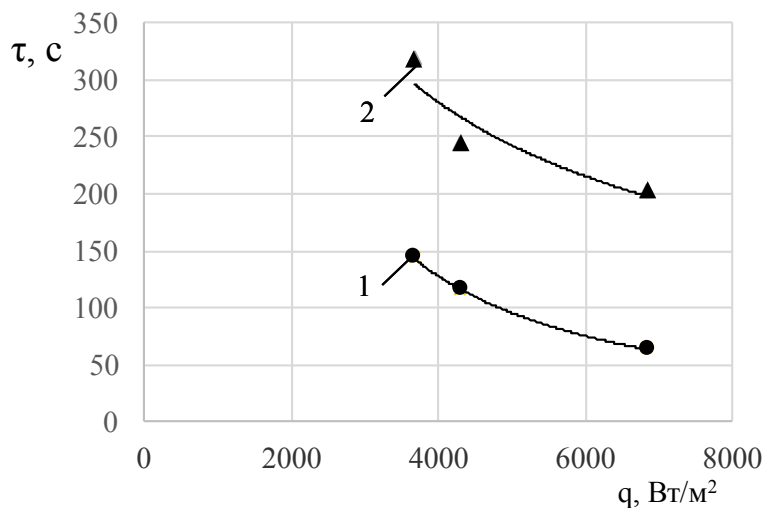
1 – $q=3665 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $q=4300 \text{ Вт/м}^2$; 3 – $q=6835 \text{ Вт/м}^2$;

◆, ▲, ● – експериментальні дані; — – теоретичні дані

Рисунок 3.7 – Залежність швидкості сушіння флютингу ($g=125 \text{ г/м}^2$) від вологовмісту при різних густинах теплового потоку

це можна пояснити тим, що ІЧВ є внутрішнім джерелом теплоти, яка виділяється в об'ємі [15, 54]. При цьому критичний вологовміст становить $u_{\text{ІК}}=0,4 \text{ кг/кг}$.

Графічну залежність часу сушіння першого періоду цього процесу від густини теплового потоку за результатами експерименту ($u_0=1,72 \text{ кг/кг}$) показано на рисунку 3.8.



1 – тривалість сушіння флютингу до закінчення першого періоду; 2 – загальний час сушіння (до $u = 0 \text{ кг/кг}$)

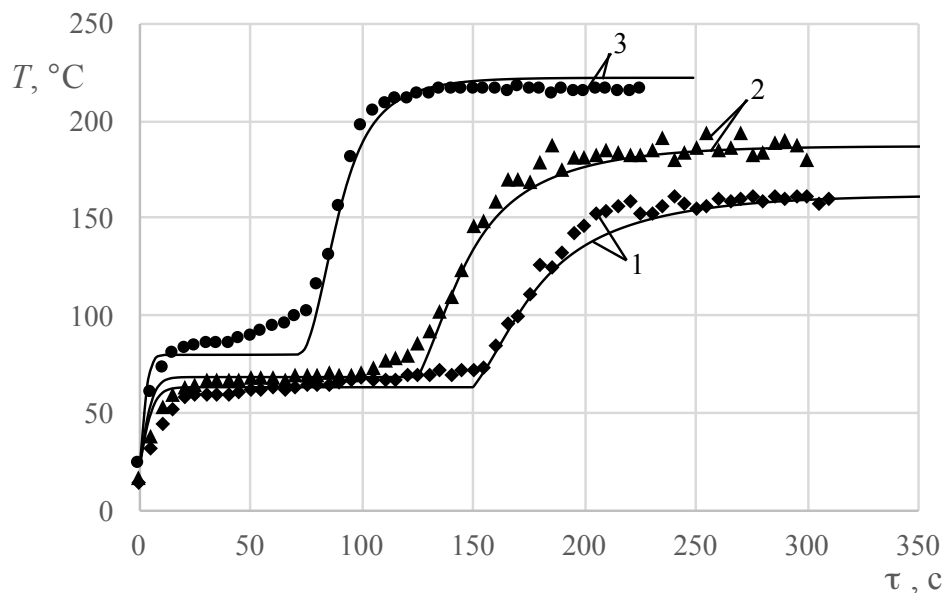
Рисунок 3.8 – Залежність часу сушіння флютингу від густини теплового потоку

Аналіз результатів показує, що за невеликих густин променевих теплових потоків до 7 кВт/м^2 і постійній відносній вологості повітря в зоні сушіння інтенсивність сушіння флютингу в першому періоді сушіння пропорційна густині теплового потоку. Така залежність вказує на те, що інтенсивність сушіння в першому періоді лімітується густиною теплового потоку.

Згідно рисунку 3.8 зі збільшенням густини теплового потоку інтенсивність зростання швидкості сушіння зменшується.

Залежності температури поверхні флютингу від часу сушіння для флютинга масою квадратного метру 125 г/м^2 за різних значень густини теплових потоків показано на рисунку 3.9.

Згідно рисунку 3.9 процес нагрівання флютингу до температури першого періоду сушіння здійснюється за короткий час, що складає лише 4-5 % від загального часу сушіння.



1 – $q=3665 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $q=4300 \text{ Вт/м}^2$; 3 – $q=6835 \text{ Вт/м}^2$;

◆, ▲, ● – експериментальні дані; — – теоретичні дані

Рисунок 3.9 – Залежність температури поверхні флютингу ($g=125 \text{ г/м}^2$) від часу сушіння за різних густин теплового потоку

Температура вологої поверхні флютингу в першому періоді за малої густини променевого теплового потоку 3685 Вт/м^2 та постійній відносній

вологості повітря тримається майже сталою величиною і близькою до температури мокрого термометра (крива 1). Сталість температури в першому періоді сушіння підтримується постійною густиною променевого теплового потоку, що витрачається на випаровування поверхневої вологи та обмежує швидкість підводу теплоти.

Зі збільшенням густини променевого теплового потоку (крива 2) температура поверхні флютингу в першому періоді сушіння поступово зростає. Очевидно, це обумовлено збільшенням виділення теплової енергії від ІЧВ у внутрішніх шарах флютингу, температура яких вища за температуру поверхні флютингу, яка втрачає теплоту в довкілля.

За суттєвого збільшення густини променевого теплового потоку (крива 3) температура флютингу збільшується. Її величина зростає протягом всього першого періоду сушіння та залежить, очевидно, від тиску насичення і не відповідає температурі мокрого термометра. Збільшення температури в першому періоді сушіння паперу описано в праці [9].

На початку другого періоду сушіння спостерігаються прямолінійні ділянки температурних кривих (рисунк 3.9). Таке положення кривих вказує на постійну швидкість зростання температури, що, очевидно, можна пояснити випаровуванням вологи з мікрокапілярів [84], маса якої зменшується з постійною швидкістю.

Перехід прямолінійних ділянок температурних кривих в криволінійні обумовлений, очевидно, випаровуванням адсорбційної вологи. При цьому швидкість зростання температури прямує до нуля, досягається рівновага між виділенням теплоти у флютингу та її втратами в навколишнє середовище. Збільшення температури в кінці процесу вище 140-150 °C може викликати окислення флютингу.

Збільшення відхилень теоретичних значень температури від експериментальних в кінці процесу сушіння (крива 3) можна пояснити збільшенням енергії на подолання сил адсорбції молекул води, що не враховувалося в рівняннях математичної моделі.

3.5.2 Дослідження впливу маси квадратного метру флютингу на кінетику сушіння

Експериментальні дослідження для визначення впливу маси квадратного метру проводились на зразках флютингу марки Б-1 з масою квадратного метру 112 г/м², 125 г/м², 140 г/м² та 200 г/м².

Узагальнені результати експериментів наведено у вигляді графічних залежностей вологовмісту флютингу від часу сушіння $u=f(\tau)$ (криві сушіння), температури поверхні флютингу від часу сушіння $t=f(\tau)$ та швидкості сушіння від вологовмісту $du/d\tau=f(u)$ [19, 89, 90, 91].

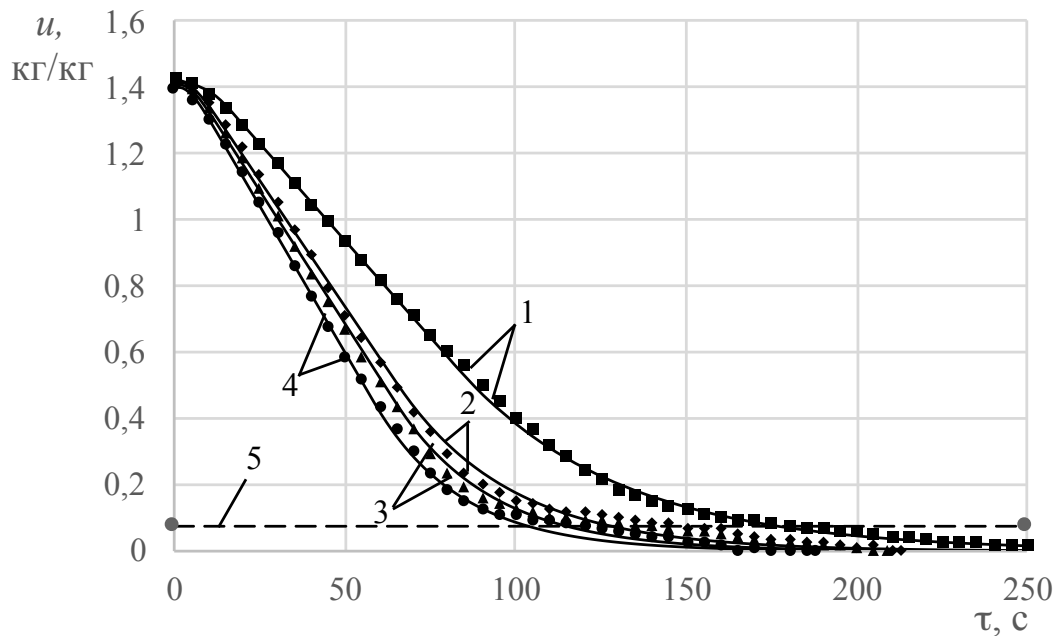
Для зручності порівняння разом з експериментальними даними на графіках нанесені результати розрахунку за математичною моделлю, наведеної в розділі 2.

Результати експериментів наведено в додатку Б. Числові дані експерименту наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати експерименту

Маса квадратного метру, г/м ²	Швидкість сушіння в першому періоді, кг/кг·с	Тривалість першого періоду сушіння, с	Середня температура поверхні флютингу в першому періоді, °С	Температура поверхні флютингу, °С		Загальний час сушіння, с	
				$u=0,075$	$u=0$	до $u=0,075$	до $u=0$
				кг/кг	кг/кг	кг/кг	кг/кг
112	0,0192	56	90	218	223	120	189
125	0,0178	61	92	218	223,5	137	203
140	0,0166	65	94	219	224	148	212
200	0,0112	90	98	225	231	180	252

Графічні залежності вологовмісту від часу сушіння для флютингу з різними масами квадратного метру при густині теплового потоку 6835 Вт/м² показано на рисунку 3.10.



1 – $g=200$ г/м²; 2 – $g=140$ г/м²; 3 – $g=125$ г/м²; 4 – $g=112$ г/м²; 5 – $u=0,075$ кг/кг;

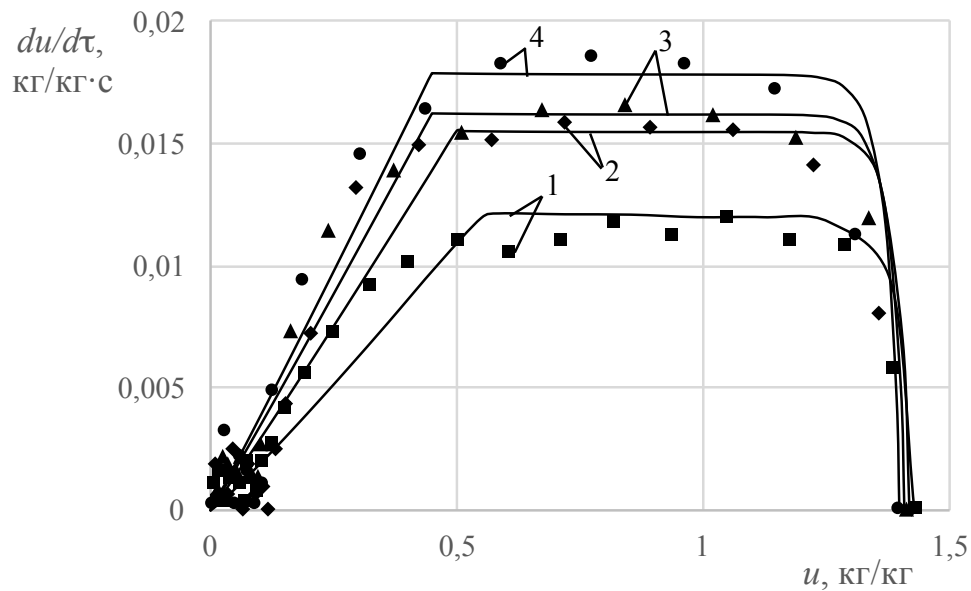
■, ◆, ▲, ● – експериментальні дані; — – теоретичні дані

Рисунок 3.10 – Криві сушіння флютингу за різної маси квадратного метру та сталій густині теплового потоку (6835 Вт/м²)

Аналіз кривих сушіння показує, що зі збільшенням маси квадратного метру флютингу збільшується час сушіння і зменшується інтенсивність (швидкість) сушіння. Така тенденція характерна і для інших типів паперу [66]. Причинами таких залежностей є збільшення товщини зразків флютингу і, відповідно, збільшенню їх маси квадратного метру. Зі збільшенням товщини флютингу збільшуються тепловий, дифузійний та гідравлічний опори відповідно масі зразків. Тому зразки з меншою товщиною і масою за однакової густини променевого теплового потоку прогриваються і сохнуть значно швидше, порівняно зі зразками більшої товщини, що містять більше води і потребують більше теплоти на сушіння.

Залежність швидкості сушіння цих зразків флютингу від вологовмісту по періодам сушіння за сталого значення густини теплового потоку 6835 Вт/м² показано на рисунку 3.11.

Наведені залежності підтверджують твердження, що зі збільшенням маси квадратного метру флютингу швидкість сушіння зменшується.



1 – $g=200$ г/м²; 2 – $g=140$ г/м²; 3 – $g=125$ г/м²; 4 – $g=112$ г/м²;

■, ◆, ▲, ● – експериментальні дані; — – теоретичні дані

Рисунок 3.11 – Залежність швидкості сушіння флютингу від вологовмісту за різної маси квадратного метру та сталій густині теплового потоку (6835 Вт/м²)

Залежність маси квадратного метру від швидкості в першому періоді показано на рисунку 3.12. Видно, що зменшення швидкості сушіння відбувається за лінійним законом.

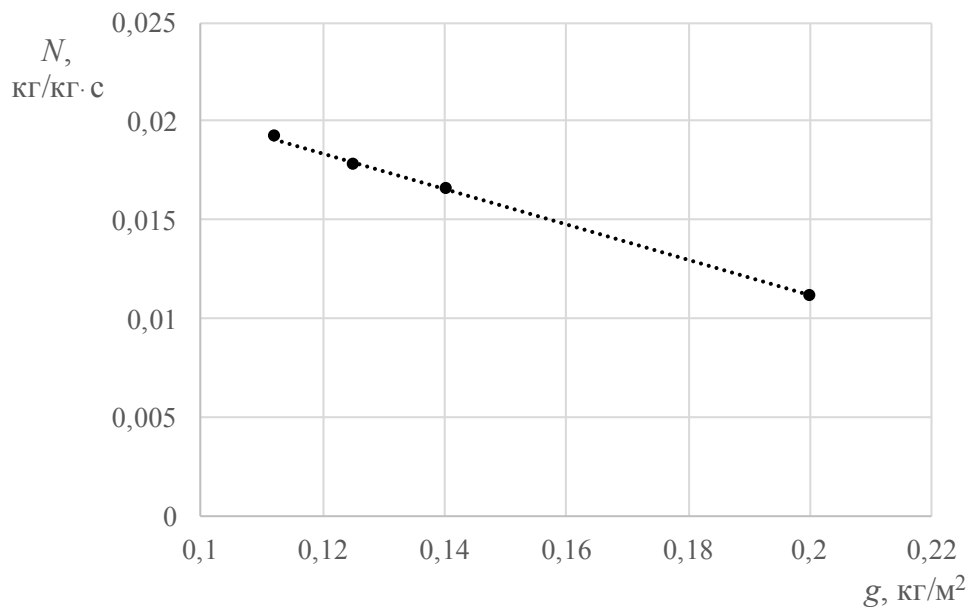
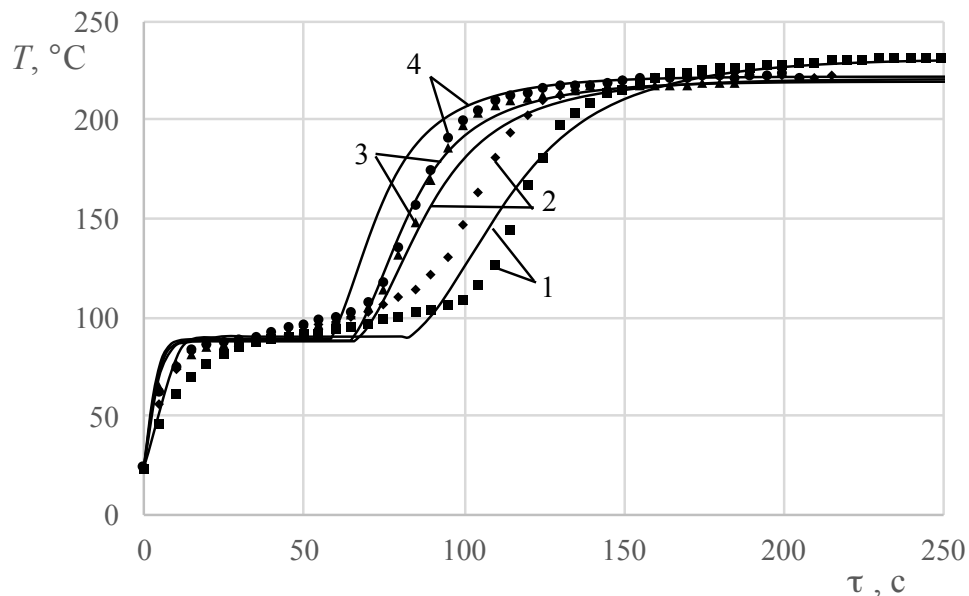


Рисунок 3.12 – Залежність швидкості першого періоду сушіння флютингу від маси квадратного метру

Залежність температури поверхні флютингу за різної маси квадратного метру та сталій густині теплового потоку (6835 Вт/м^2) показано на рисунку 3.13.



1 – $g=200 \text{ г/м}^2$; 2 – $g=140 \text{ г/м}^2$; 3 – $g=125 \text{ г/м}^2$; 4 – $g=112 \text{ г/м}^2$;

■, ◆, ▲, ● – експериментальні дані; — – теоретичні дані

Рисунок 3.13 – Залежність температури поверхні флютингу від часу за різної маси квадратного метру та сталій густині теплового потоку (6835 Вт/м^2)

Аналіз впливу маси квадратного метру зразків на температуру їх поверхні показує, що в першому періоді сушіння температура поверхні наближається до температури кипіння за атмосферного тиску. Більш висока температура поверхні зразків з більшою товщиною обумовлена більшим виділенням теплової енергії в їх об'ємі і більшим термічним та дифузійним опорами.

Після першого критичного вологовмісту температура поверхні зразків зростає в перехідному періоді за степеневим законом, після чого починається швидкий ріст температури по лінійному закону, що обумовлено випаровуванням води з мікрокапілярів. По закінченню лінійного зростання температури на початку другого періоду починається її збільшення за степеневим законом до рівноважної кінцевої, що обумовлено випаровуванням адсорбційної води до рівноважного стану.

3.5.3 Дослідження впливу початкового вологовмісту флютингу на кінетику сушіння

Експериментальні дослідження для визначення впливу початкового вологовмісту на швидкість сушіння проводились на зразках флютингу марки Б-1 з масою квадратного метру 125 г/м^2 за густини теплового потоку 3665 Вт/м^2 , 4300 Вт/м^2 , 6835 Вт/м^2 за різного початкового вологовмісту.

Узагальнені результати експериментів наведено у вигляді графічних залежностей вологовмісту флютингу від часу сушіння $u=f(\tau)$ (криві сушіння), температури поверхні флютингу від часу сушіння $t=f(\tau)$ та швидкості сушіння від вологовмісту $du/d\tau=f(u)$ [19, 89, 90, 91].

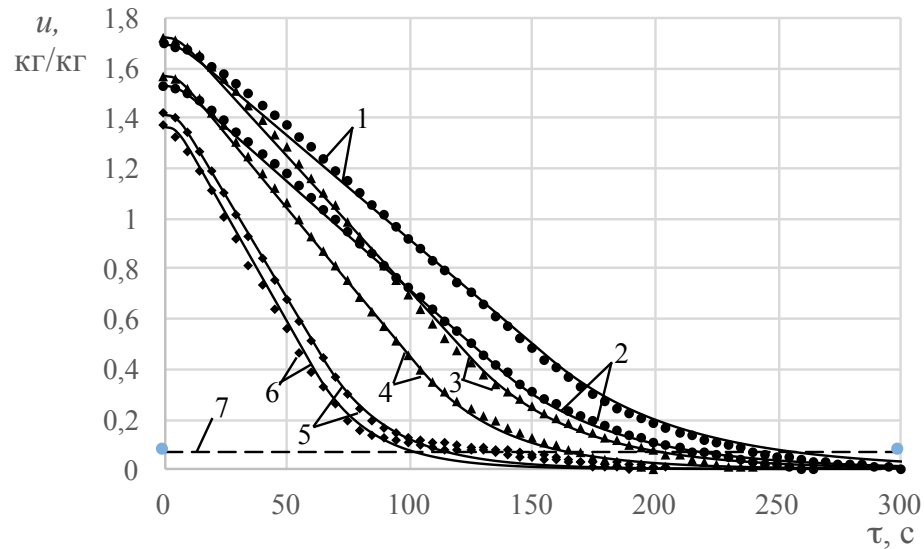
Для зручності порівняння разом з експериментальними даними на графіках нанесені результати розрахунку за математичною моделлю, наведеною в розділі 2.

Результати експериментів наведено в додатку Б. Числові дані експерименту наведено в таблиці 3.3.

Залежність вологовмісту від часу сушіння для зразків флютингу з різними масами за різного початкового вологовмісту та густині теплового потоку 6835 Вт/м^2 показано на рисунку 3.14.

Таблиця 3.3 – Результати експерименту

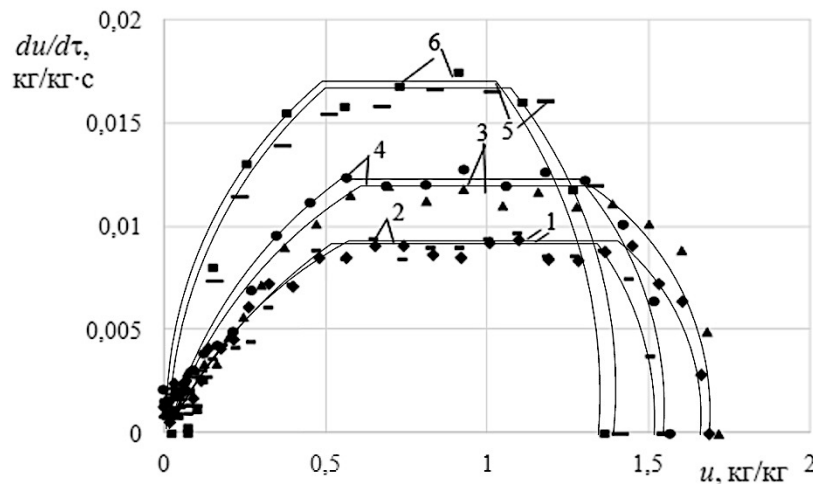
Густина теплового потоку, Вт/м^2	Початковий вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння в першому періоді, $\text{кг/кг}\cdot\text{с}$	Час завершення першого періоду сушіння, с	Середня температура поверхні флютингу в першому періоді, $^{\circ}\text{C}$	Температура поверхні флютингу (рівноважна), $^{\circ}\text{C}$		Загальний час сушіння, с	
							до $u=0,075$ кг/кг	до $u=0$ кг/кг
3665	1,71	0,0091	148	64	156	162	237	302
	1,53	0,0091	127	64	158	162	212	264
4300	1,72	0,0122	115	70	178	186	197	238
	1,57	0,0123	95	71	176	186	165	200
6865	1,41	0,0174	61	90	209	216	138	218
	1,36	0,0174	53	91	208	214	120	206



1 – $q=3665 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,71 \text{ кг/кг}$, 2 – $q=3665 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,53 \text{ кг/кг}$,
 3 – $q=4300 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,72 \text{ кг/кг}$, 4 – $q=4300 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,57 \text{ кг/кг}$,
 5 – $q=6835 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,41 \text{ кг/кг}$, 6 – $q=6835 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,36 \text{ кг/кг}$
 ◆, ▲, ● – експериментальні дані; — – теоретичні дані

Рисунок 3.14 – Залежність вологовмісту від часу сушіння флютингу ($g=125 \text{ г/м}^2$) за різного початкового вологовмісту

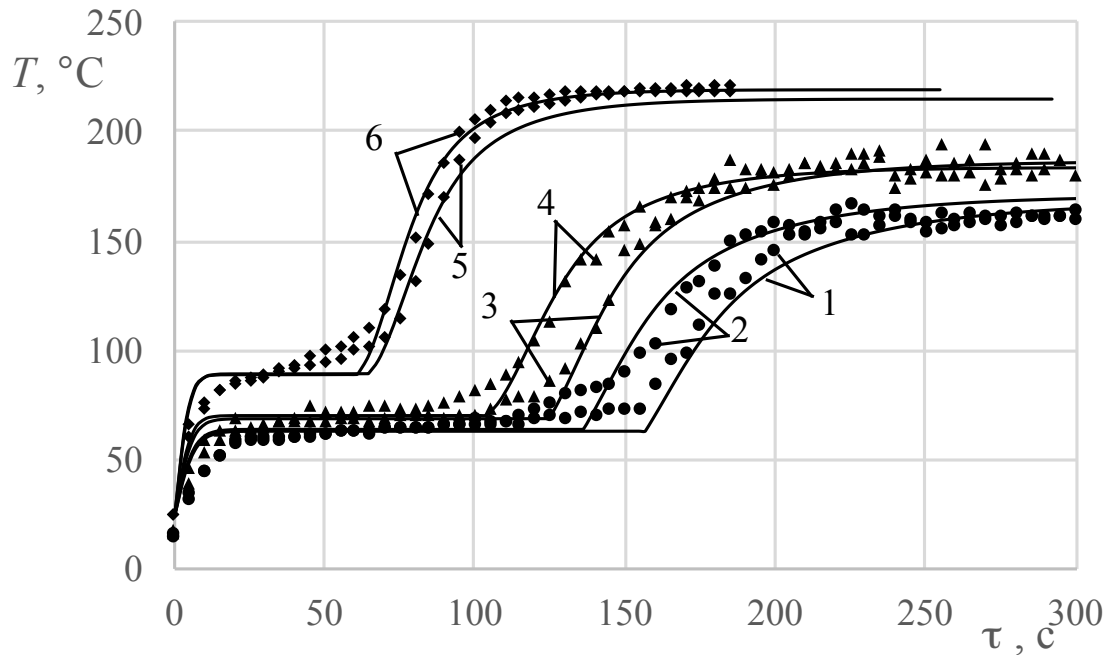
Залежність швидкості сушіння та температури цих зразків флютинга за періодами сушіння показано на рисунках 3.15 та 3.16 відповідно.



1 – $q=3665 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,71 \text{ кг/кг}$, 2 – $q=3665 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,53 \text{ кг/кг}$,
 3 – $q=4300 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,72 \text{ кг/кг}$, 4 – $q=4300 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,57 \text{ кг/кг}$,
 5 – $q=6835 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,41 \text{ кг/кг}$, 6 – $q=6835 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,36 \text{ кг/кг}$
 ◆, ▲, ● – експериментальні дані; — – теоретичні дані

Рисунок 3.15 – Залежність швидкості сушіння флютингу ($g=125 \text{ г/м}^2$) від вологовмісту за різного початкового вологовмісту

Значення середньої температури першого періоду сушіння та рівноважної температури поверхні флютинга в кінці сушіння за різних початкових вологовмістах не змінюються (рисунк 3.16).



1 – $q=3665 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,71 \text{ кг/кг}$, 2 – $q=3665 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,53 \text{ кг/кг}$,
 3 – $q=4300 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,72 \text{ кг/кг}$, 4 – $q=4300 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,57 \text{ кг/кг}$,
 5 – $q=6835 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,41 \text{ кг/кг}$, 6 – $q=6835 \text{ Вт/м}^2$, $u_0=1,36 \text{ кг/кг}$

◆, ▲, ● – експериментальні дані; — – теоретичні дані

Рисунок 3.16 – Залежність температури поверхні флютингу від часу сушіння за $g=125 \text{ г/м}^2$ та різних значеннях початкового вологовмісту

Аналізуючи вплив значення початкового вологовмісту на швидкість сушіння можна відмітити, що початковий вологовміст не впливає на швидкість сушіння. Проте зі збільшенням початкового вологовмісту час сушіння збільшується в результаті більшої кількості вологи всередині матеріалу. Такі результати спостерігаються і зі зміною значення густини теплового потоку.

Суттєвого впливу початкового вологовмісту на температуру флютингу під час сушіння не виявлено.

3.6 Визначення коефіцієнтів вологообміну за періодами сушіння

Згідно формули (1.25) коефіцієнт вологообміну в першому періоді сушіння можна виразити як:

$$\beta = \frac{\frac{du}{d\tau} g_f}{(p_{\text{п}} - p_{\text{п нс}})} = \frac{N g_f}{(p_{\text{п}} - p_{\text{нс}})} \quad (3.2)$$

де N швидкість сушіння в першому періоді, с^{-1} ; g_f – маса квадратного метру флютингу, кг/м^2 ; $p_{\text{п}}$ – тиск пари на поверхні флютингу, Па; $p_{\text{п нс}}$ – парціальний тиск пари в прилеглому до флютингу навколишньому середовищі, Па.

З врахуванням рівняння (1.21) формула 3.2 набуде вигляду:

$$\beta = \frac{N g_f}{(p_{\text{п}} - \varphi p_{\text{н нс}})} \quad (3.3)$$

де φ – відносна вологість повітря; $p_{\text{н нс}}$ – тиск насиченої пари за температури повітря, Па.

Згідно [84] значення коефіцієнту вологообміну в першому періоді постійне. Для підтвердження цього за експериментальними даними, які наведено в додатку Б, за формулою (3.3) побудована залежність коефіцієнту вологообміну від часу першого періоду (рисунок 3.17):

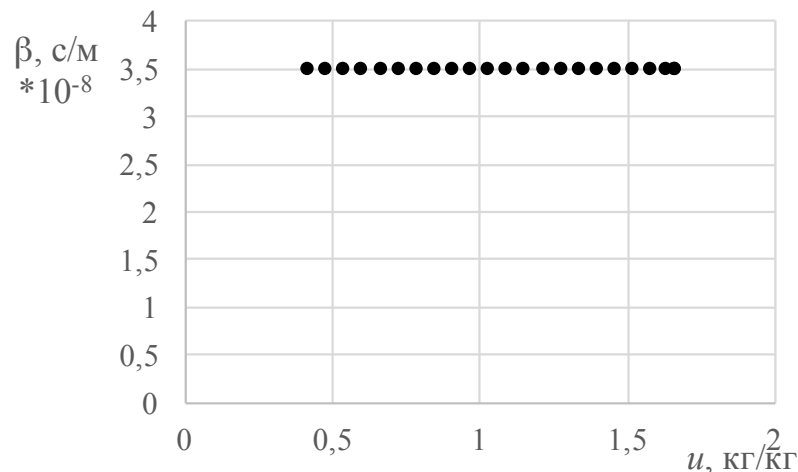


Рисунок 3.17 – Залежність коефіцієнту вологообміну від вологовмісту у першому періоді сушіння

Як видно з рисунку 3.17 коефіцієнт вологообміну в першому періоді сушіння постійний.

Залежність коефіцієнту вологообміну в першому періоді сушіння від маси квадратного метру флютингу показано на рисунку 3.18.

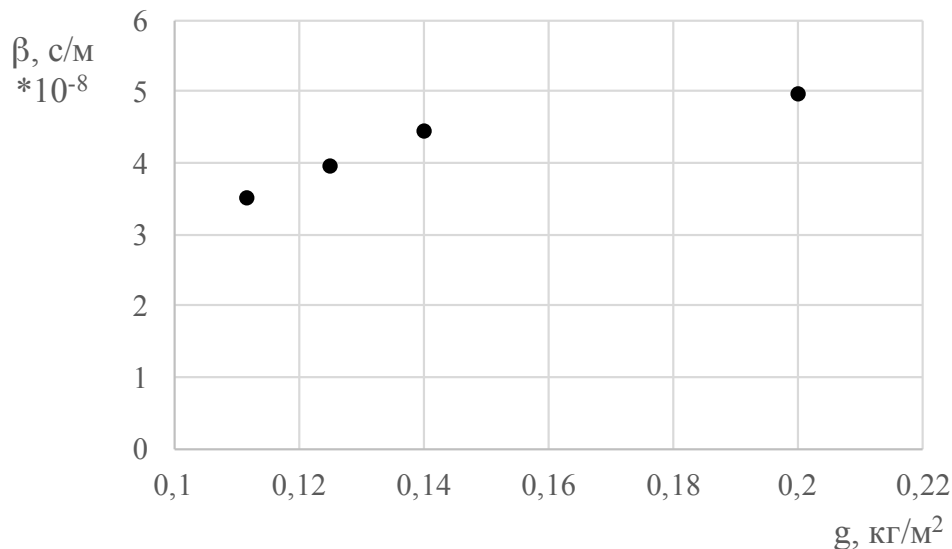


Рисунок 3.17 – Залежність коефіцієнту вологообміну в першому періоді сушіння від маси квадратного метру флютингу

Як видно з рисунку 3.17, зі збільшення маси квадратного метру значення коефіцієнту вологообміну збільшується.

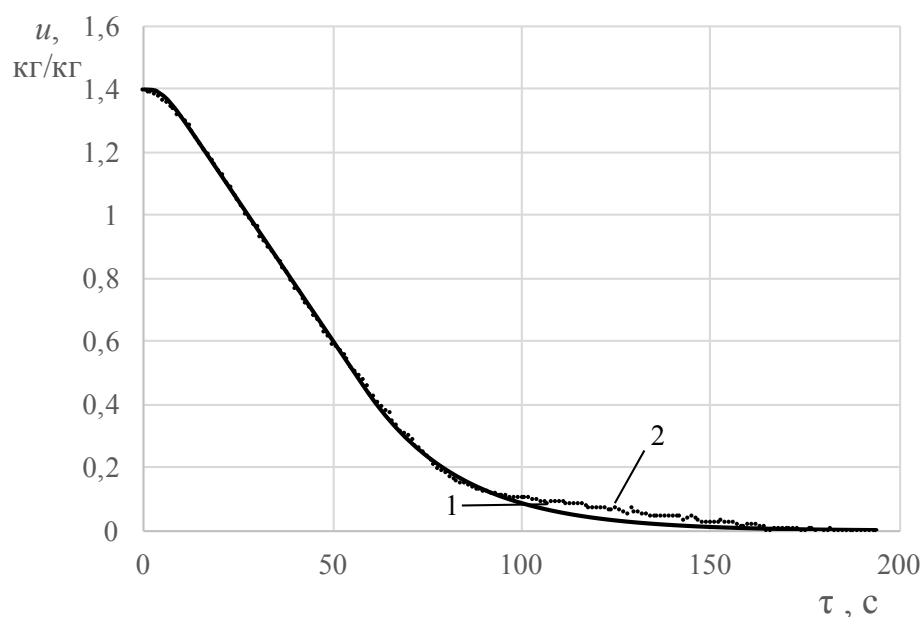
Таким чином за отриманими кінетичними закономірностями сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ та використовуючи формулу (3.3) можна визначити коефіцієнт вологообміну в першому періоді сушіння.

Коефіцієнт вологообміну в другому періоді сушіння β_2 зменшується в часі. Перше максимальне значення коефіцієнту розраховується за формулою (1.36) за визначеною швидкістю першого періоду з рівняння (1.25).

3.7 Перевірка адекватності математичної моделі

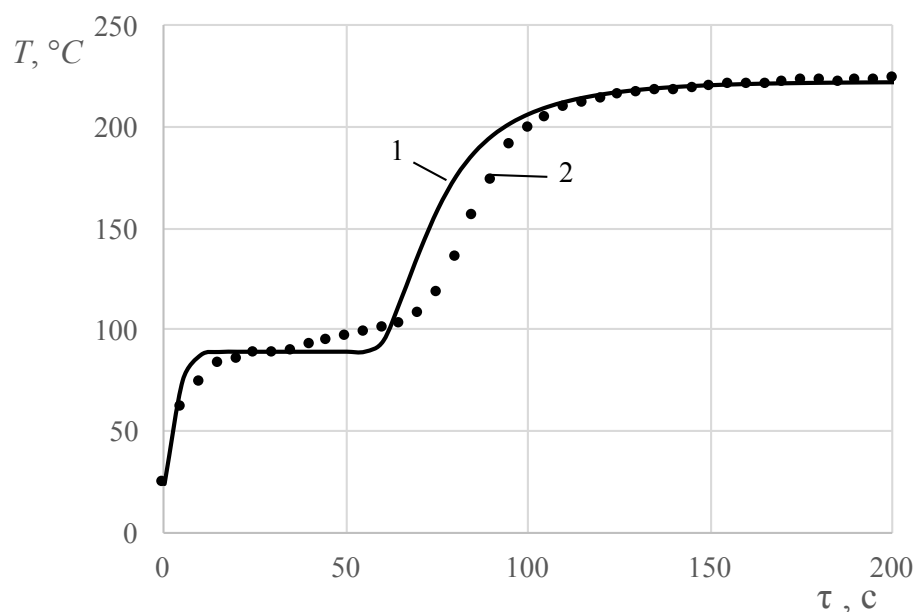
Перевірка адекватності математичної моделі результатам експерименту здійснювалась шляхом порівняння розрахункових значень вологовмісту та температури в часі з експериментально визначеними.

Таблиця з даними за результатом розрахунку математичної моделі та даними експерименту наведено в додатку Д. Графічне порівняння результатів розрахунку та експерименту за вологовмістом та температурою показано на рисунках 3.19 та 3.20 відповідно.



1 – розрахункові дані; 2 – експериментальні дані

Рисунок 3.19 – Залежність вологовмісту флютингу від часу сушіння



1 – розрахункові дані; 2 – експериментальні дані

Рисунок 3.20 – Залежність температури поверхні флютингу від часу сушіння

В якості критерію адекватності вибрано критерій Фішера [109]. Табличне значення критерію Фішера обране за коефіцієнтом значущості $p = 0,05$ (ймовірність $\alpha = 0,95$).

Відповідно методики [65] порівняємо значення двох вибірок (вологівмісту та температури по часу) за критерієм Фішера. Для цього визначимо середні значення вибірок за формулою:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.2)$$

де n – кількість значень у вибірці; x_i – поточне значення вологовмісту чи температури за розрахунком чи вимірюванням, кг/кг та °C відповідно.

Визначимо дисперсії по кожній з вибірок:

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (3.3)$$

Розрахуємо число ступенів вільності кожної з вибірок:

$$df = (n - 1), \quad (3.4)$$

Емпіричні критерії Фішера визначимо як:

$$F_i = \frac{S_{x_1}^2}{S_{x_2}^2}, \text{ якщо } S_{x_1}^2 > S_{x_2}^2 \quad (3.5)$$

або

$$F_i = \frac{S_{x_2}^2}{S_{x_1}^2}, \text{ якщо } S_{x_2}^2 > S_{x_1}^2 \quad (3.6)$$

Умова відповідності результатів розрахунку за математичною моделлю експериментальним даним:

$$F_i < F_{\text{табл } i}, \quad (3.7)$$

де $F_{\text{табл } i}$ – табличне значення критерія Фішера за рівнем значущості $p = 0,05$.

Результати розрахунку критеріїв Фішера наведено в таблиці 3.3.

Порівняємо згідно таблиці 3.3 умови відповідності розрахункових даних експериментальним за вологовмістом та температури:

$$F_i < F_{\text{табл } i}, 1,019 < 1,267$$

$$F_i < F_{\text{табл } i}, 1,034 < 1,682$$

Таблиця 3.3 – Результати розрахунку адекватності математичної моделі

Параметр	Тип даних	Середнє значення	Дисперсія	Число ступенів вільності	Критерій Фішера (розрахунк.)	Критерій Фішера (табличний)
Вологовміст, кг/кг	розрахунк.	0,35	0,199	194	1,019	1,267
	експерим.	0,36	0,196	194		
Температура, °C	розрахунк.	168,3	3903	41	1,034	1,682
	експерим.	163,4	4037	41		

Таким чином запропонована математична модель адекватно описує процес сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ.

3.7 Висновки

1. Отримано експериментальні кінетичні закономірності процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ.

2. Встановлено основні параметри процесу та їх вплив на інтенсивність сушіння флютингу.

3. Показано, що за невеликих густин променевих теплових потоків до 7 кВт/м² і постійній відносній вологості повітря в зоні сушіння інтенсивність сушіння флютингу в першому періоді сушіння пропорційна густині теплового потоку та лімітується густиною теплового потоку.

4. Встановлено, що зі збільшенням густини теплового потоку зростання швидкості сушіння менш інтенсивне. Збільшення густини теплового потоку в 1,17 раз (з 3665 Вт/м² до 4300 Вт/м²) підвищує швидкість сушіння в першому періоді в 1,3 рази. Збільшення густини теплового потоку в 1,58 раз (з 4300 Вт/м² до 6835 Вт/м²) підвищує швидкість сушіння в першому періоді лише в 1,5 рази.

5. Встановлено, що зі збільшенням маси квадратного метру швидкість сушіння зменшується за лінійним законом, збільшуючи тривалість сушіння.

6. Збільшення початкового вологовмісту за однакових інших параметрів на швидкість сушіння та температуру флютингу не впливає, збільшується лише час процесу сушіння.

7. Визначено, що значення коефіцієнту вологообміну в першому періоді сушіння флютингу постійне і зростає зі збільшенням маси квадратного метру.

8. Встановлено, що сушіння флютингу до вологовмісту меншого за 0,075 кг/кг є недоцільним через суттєве збільшення тривалості сушіння та витрат енергії.

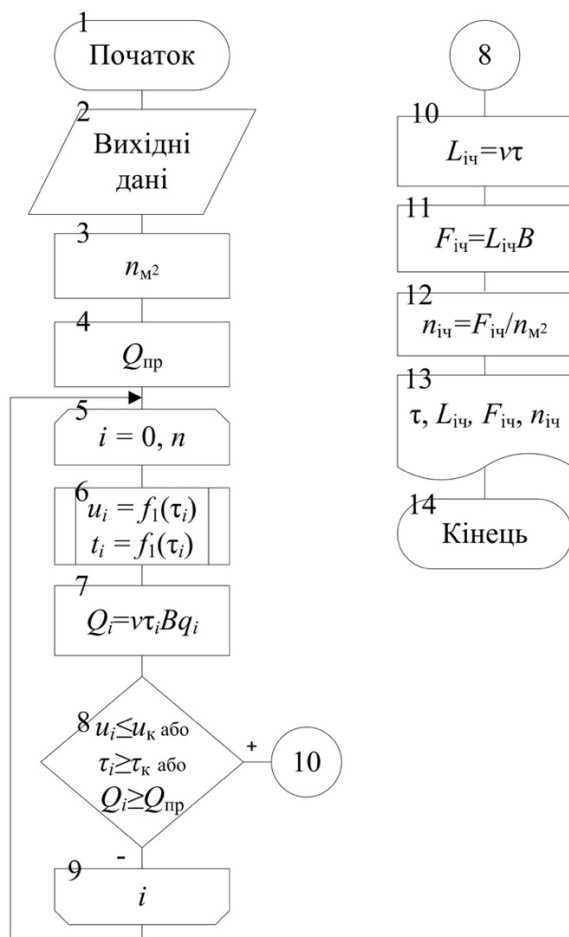
9. Під час сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ температура флютингу в першому періоду зростає. Інтенсивність зростання температури збільшується зі збільшенням густини теплового потоку і може бути більшою температури мокрого термометра, прямуючи до температури насичення.

10. Показано, що сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ найбільш доцільне в періодах нагрівання та першому періоді сушіння, де забезпечується максимальна інтенсивність процесу.

4 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СУШІННЯ ФЛЮТИНГУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕНЕРГІЇ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

4.1 Алгоритм розрахунку установки інфрачервоних випромінювачів

На основі розробленої математичної моделі складено алгоритм розрахунку промислової установки сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ (рисунок 4.1).



1 – початок алгоритму; 2 – ввід вихідних даних; 3 – визначення кількості ІЧ-панелей на 1м²; 4 – розрахунок необхідної теплоти для сушіння флютингу в періоді нагріву; 5 – початок циклу; 6 – визначення поточних значень вологовмісту та температури; 7 – визначення кількості наданої теплоти від ІЧВ до флютингу в даний момент часу від початку сушіння; 8 – порівняння поточних значень з умовами виходу з циклу; 9 – кінець циклу; 10 – визначення довжини установки ІЧ випромінювачів; 11 – площа поверхні флютингу, що розташована під ІЧ випромінювачами; 12 – загальна кількість ІЧ випромінювачів; 13 – вивід даних; 14 – кінець розрахунку

Рисунок 4.1 – Блок-схема до розрахунку промислової установки ІЧ випромінювачів

Згідно алгоритму можна визначити час сушіння флютингу до заданого вологовмісту, довжину необхідної установки ІЧ випромінювачів, площу зони випромінювання та кількість ІЧ випромінювачів заданої потужності.

Після початку роботи програми за алгоритмом (блок 1) в блоці 2 згідно рисунку 4.1 задаються вихідні дані: маса квадратного метру флютингу,

швидкість ПРМ, ширина полотна флютингу, початковий вологовміст та температура, вологість та температура газового теплоносія в зоні сушіння, характеристика ІЧ випромінювачів (потужність, температура поверхні, габарити, тип). Також в залежності від мети розрахунку задається або кінцевий вологовміст, або конструктивно допустимий час перебування флютингу під ІЧ випромінювачами.

В блоці 3 визначається кількість ІЧ випромінювачів для заповнення 1 м^2 поверхні випромінювання. Для забезпечення заданої густини теплового потоку із закону Стефана-Больцмана визначається необхідна температура панелі ІЧ випромінювача, за якою і підбирається ІЧ пристрій. Площа і потужність одного ІЧ випромінювача визначається за його паспортними даними.

В блоці 4 за умови застосування ІЧВ для сушіння флютингу в періоді нагріву визначається необхідна кількість теплоти.

В блоці 5 – 9 відбувається цикл розрахунку визначення часу, температури та вологовмісту флютингу. Блок 5 – початок циклу.

В блоці 6 алгоритму поточне значення вологовмісту та температури поверхні флютингу визначаються за розробленим математичним описанням процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ (розділ 2).

В блоці 7 розраховується кількість наданої теплоти від ІЧ випромінювачів до флютингу в даний момент часу від початку сушіння.

В залежності від поставленої задачі розрахунку в блоці 8 виконується порівняння поточних значень з умовами виходу з циклу. Умовою закінчення визначення поточних вологовмісту та температури є заданий кінцевий вологовміст або час сушіння (обмежений конструкцією сушильної частини), або кількість теплоти, визначеної в блоці 4 (за умови сушіння флютингу радіаційним способом в періоді нагрівання).

В блоках 10 та 11 визначаються відповідно довжина та площа установки ІЧ випромінювачів. Загальна кількість ІЧ пристроїв розраховується в блоці 12.

Алгоритм розрахунку установки ІЧ випромінювачів закінчується в блоці 14 після виведення результатів розрахунку (блок 13).

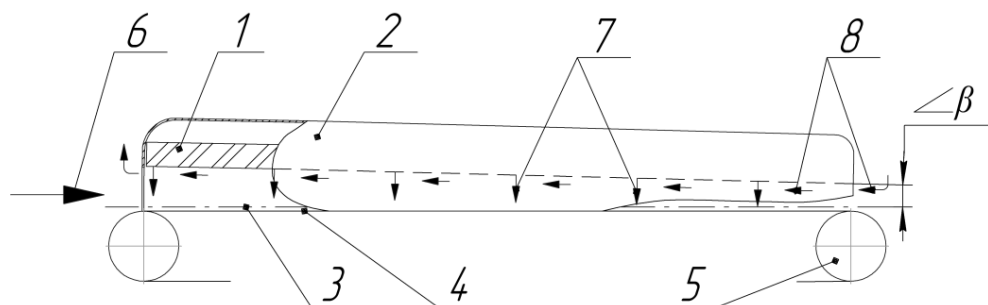
4.2 Розробка обладнання для сушіння флютингу

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволили розробити ряд нових енергоефективних способів і зразків пристроїв для сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання, новизна яких підтверджена патентами України на корисні моделі.

4.2.1 Під час сушіння флютингу найбільше значення швидкості сушіння в періоді постійної швидкості. На початку процесу швидкість сушіння флютингу обмежена інтенсивністю його нагрівання [84]. Збільшення інтенсивності нагріву зменшить загальний час сушіння та витрати енергії.

Для збільшення інтенсивності нагріву флютингу запропонований пристрій з ІЧ випромінювачами (рисунок 4.2), захищений патентом України на корисну модель №35068 [99, 104].

Встановлення ІЧ пристрою під кутом до площини полотна флютингу відбувається на початку сушильної частини ПРМ. Відстань від поверхні полотна до поверхні інфрачервоного випромінювача зменшується по ходу паперового полотна, утворюючи канал, який закритий з боків вздовж руху паперового полотна теплоізоляційними стінками. Поперечний перетин каналу зменшується по ходу полотна. В каналі створюється потік парогазової суміші, направлений проти ходу паперового полотна. Внаслідок цього збільшується швидкість газів і, відповідно, конвективна складова переносу тепла від нагрітих газів до паперу та інтенсивність відводу водяної пари від поверхні флютингу.



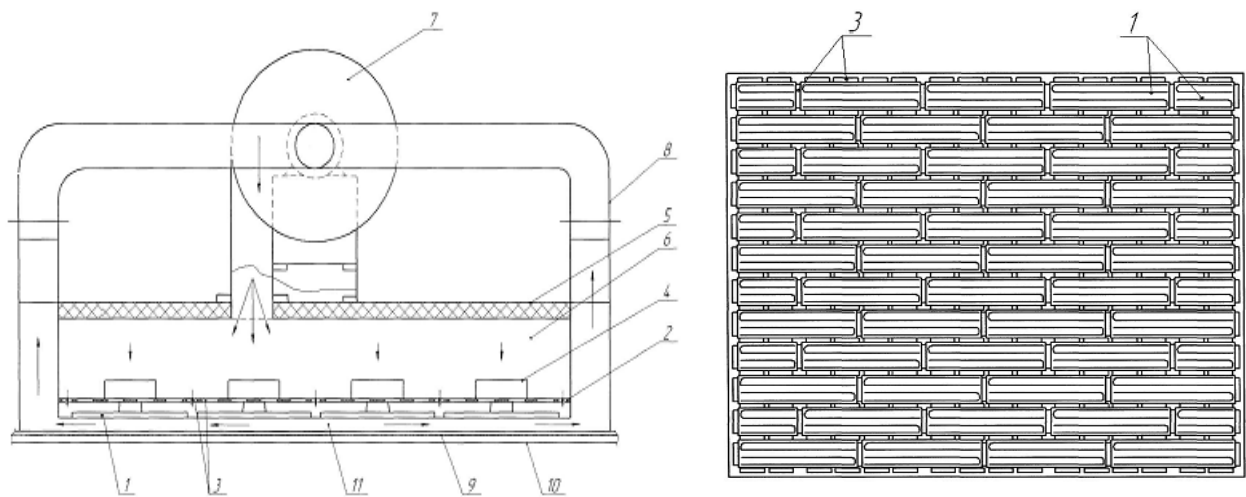
1 – ІЧ панель; 2 – кожух; 3 – паперове полотно; 4 – сукно; 5 – сітковедучий вал; 6, 8 – напрями руху паперу та повітря; 7 – ІЧВ

Рисунок 4.2 – Пристрій для нагрівання та сушіння паперу

4.2.2 Під час сушіння флютингу зменшення тривалості цього процесу стримується в зв'язку з тим, що деяка кількість теплоти витрачається на випаровування вологи. В результаті цього збільшується час періоду нагрівання та часу сушіння в цілому.

Для зменшення тривалості періоду нагрівання вирішено зменшити інтенсивність випаровування у флютингу на початку процесу сушіння. Можливим технічним рішенням є збільшення ступеня насичення гарячої водяної пари в зоні сушіння над полотном флютингу.

Запропоновано пристрій для нагрівання флютингу із застосуванням ІЧВ (рисунок 4.3), який містить корпус з розміщеною у ньому щонайменше однією лампою ІЧВ, вентилятор, патрубки для подачі й відводу повітря для охолодження зазначеної лампи, а також дифузор для розподілення повітря на поверхню паперу. Відрізняється тим, що патрубки вентилятора для подачі й відводу повітря сполучені між собою каналом, який утворений ламповою панеллю, полотном флютингу і вертикальними стінками корпусу.



**1 – ІЧ випромінювач; 2 – лампова панель; 3 – отвори; 4 – кріплення ламп;
5 – корпус; 6 – дифузор; 7 – вентилятор; 8 – повітропровід; 9 – паперове
полотно; 10 – сукно; 11 – канал проходу теплоносія**

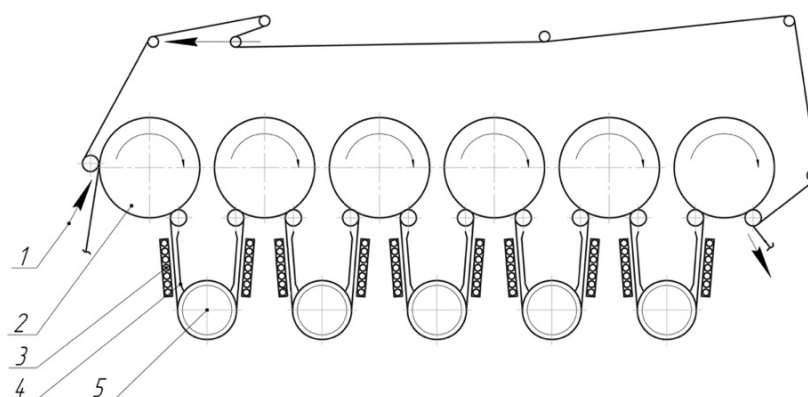
Рисунок 4.3 – Схема пристрою для швидкого нагрівання

Завдяки замкненій циркуляції газоподібного теплоносія (повітря) в зоні сушіння воно нагрівається від ІЧ випромінювачів та швидко стає насиченим від

видаленої з флютингу води у вигляді пари. Збільшення насиченості зменшує рушійну силу випаровування. А висока температура парогазової суміші в зоні сушіння зменшує втрати теплоти від флютингу, що нагрівається від виділеної теплоти під час проходження ІЧВ.

Технічне рішення захищене патентом України на корисну модель №58917 [105].

4.2.3 Для зменшення кількості сушильних циліндрів запропоновано сушильну групу ПРМ (рисунок 4.4), в якій на вільному пробігу полотна флютингу встановлено пристрої з ІЧ випромінювачами. Завдяки збільшенню кількості виділеної у флютингу теплоти від ІЧВ зменшується площа сушильних циліндрів і, відповідно, їх кількість. Це дозволяє зменшити енерговитрати на допоміжні операції, довжину сушильної частини та витрати пари в сушильних циліндрах.



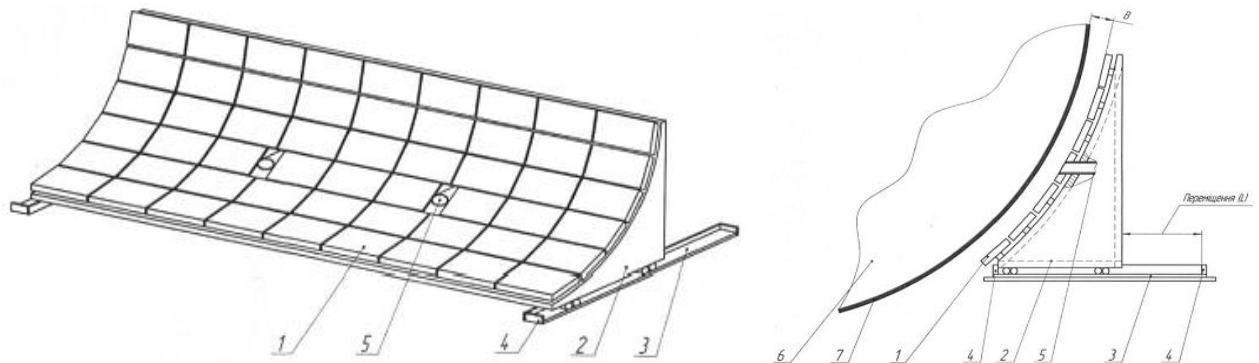
1 – паперове полотно; 2 – сушильний циліндр з сіткою/сукном; 3 – ІЧ випромінювачі; 4 – рефлектор; 5 – продувний чи відсмоктувальний валик

Рисунок 4.4 – Сушильна група ПРМ

Робоча поверхня випромінювачів направлена на рухоме флютингове полотно, знаходячись на відстані 30-50 мм від нього. Зі зворотної сторони полотна флютингу та сітки встановлені направляючі. Вони створюють направлений потік газоподібного теплоносія, який збільшує сухість сітки/сукна, покращуючи відведення вологи з флютингу.

Технічне рішення захищене патентом України на корисну модель №105956 [107].

4.2.4 Для збільшення інтенсивності сушіння розроблено пристрій з ІЧ випромінювачами (рисунок 4.5), який встановлено біля сушильних циліндрів або лоцильного циліндра з можливістю відведення від полотна флютингу.



1 – ІЧ випромінювачі; 2 – рама; 3 – направляючі; 4 – обмежувачі руху пристрою; 5 – вентиляційні отвори; 6 – циліндр; 7 – полотно флютингу

Рисунок 4.5 – Пристрій з ІЧ випромінювачами

В разі обриву полотна для швидкого відведення нагрітої поверхні випромінювачів рама розміщується на направляючих. Крім того, це дозволить полегшити обслуговування установки під час заміни ІЧ панелей.

Встановлення пристрою з ІЧ випромінювачами збільшує густину сумарного теплового потоку, що збільшує інтенсивність сушіння.

Технічне рішення пристрою для сушіння захищене патентом України на корисну модель №100580 [100, 103, 114].

4.3 Визначення питомих затрат на сушіння флютингу

Витрати електроенергії ІЧ випромінювачами на сушіння флютингу залежить від ряду факторів: ККД інфрачервоного випромінювача, довжини інфрачервоних хвиль і, як наслідок, ступеня перетворення ІЧВ в теплову енергію у флютингу, тарифу спожитої електроенергії.

В Україні для підприємств існує три типи тарифікації електроенергії: одно-, дво- та тризонна. За багатозонної тарифікації електроенергії тариф різниться в залежності від часу доби [113]. Розрахунки, що необхідні для порівняння

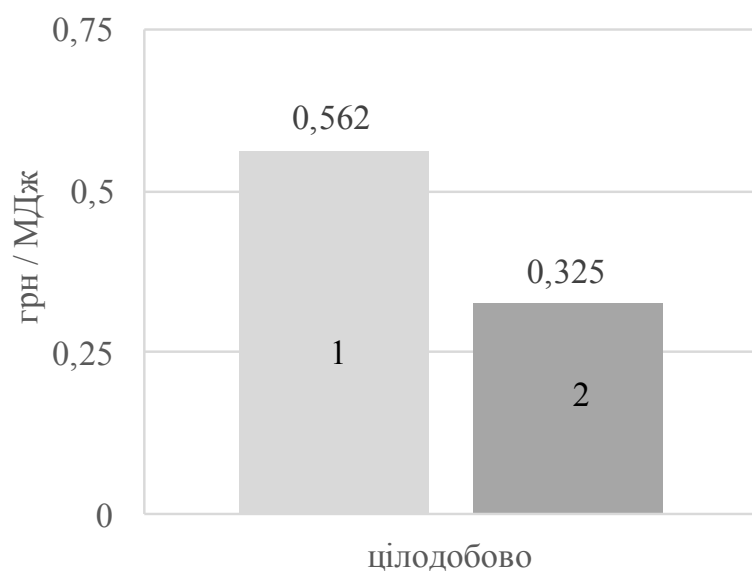
вартості енергоресурсів, наведено в додатку Е.

Часові межі та коефіцієнти тарифікації в залежності від часової зони наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Типи тарифікації та їх часові межі

Тип тарифікації	Підтип тарифікації	Часові межі	Годин	Коефіцієнт тарифікації
однозонна	—	00:00 – 24:00	24	1
двозонна	нічний	23:00 – 7:00	8	0,35
	денний	7:00 – 23:00	16	1,8
тризонна	нічний	24:00 – 7:00	7	0,25
	напівпіковий	7:00 – 8:00	11	1,02
		11:00 – 20:00		
		23:00 – 24:00		
	піковий	8:00 – 11:00 20:00 – 23:00	6	1,8

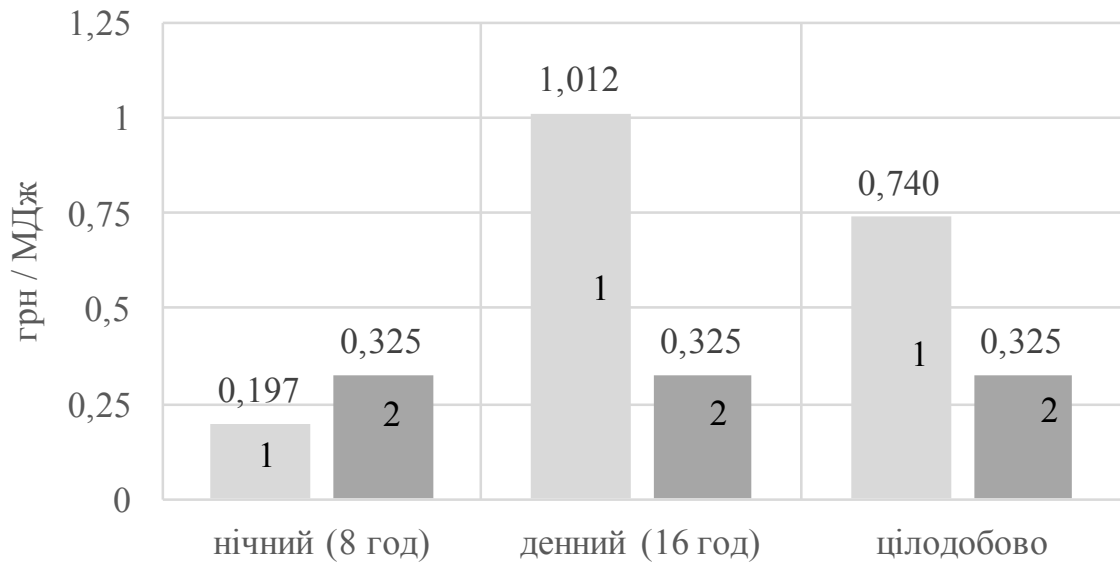
Порівняння вартості 1 МДж використаної енергії на сушіння флютингу радіаційним (із використанням ІЧВ) та контактним способами за однозонної, тарифікації електроенергії наведено на рисунку 4.6.



1 – радіаційний спосіб сушіння; 2 – контактний спосіб сушіння

Рисунок 4.6 – Порівняння вартості 1 МДж використаної енергії на сушіння флютингу за однозонної тарифікації електроенергії

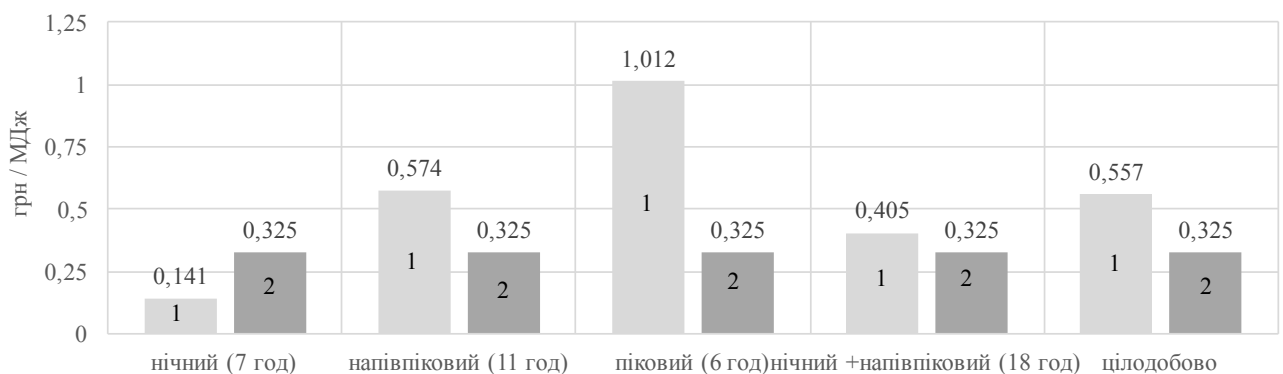
Порівняння з питомими затратами за двозонної тарифікації наведено на рисунку 4.7.



1 – радіаційний спосіб сушіння; 2 – контактний спосіб сушіння

Рисунок 4.7 – Порівняння вартості 1 МДж використаної енергії на сушіння флютингу за двозонної тарифікації електроенергії

Порівняння з питомими затратами за тризонної тарифікації наведено на рисунку 4.8.



1 – радіаційний спосіб сушіння; 2 – контактний спосіб сушіння

Рисунок 4.8 – Порівняння вартості 1 МДж використаної енергії за тризонної тарифікації електроенергії

Встановлено, що питомі затрати під час сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ за багатозонної тарифікації електроенергії в нічний період менші, ніж під час контактного способу сушіння: 0,197 грн/МДж проти

0,325 грн/МДж (за двозонної тарифікації електроенергії) та 0,141 грн/МДж проти 0,325 грн/МДж (за тризонної тарифікації електроенергії).

Як було вказано в розділі 3, ІЧВ для сушіння флютингу доцільно застосовувати в періодах нагріву та постійної швидкості сушіння. У випадку використання ІЧ випромінювачів на існуючій сушильній частині ПРМ випромінювачі слід монтувати на початку сушильної частини, де відбувається нагрівання і починається перший період сушіння.

В Україні флютинг виготовляють на ПРМ з сушильними циліндрами зазвичай зі швидкістю паперового полотна 400 м/хв та шириною 4,25 м.

Встановлено економію в гривнях на тонну флютингу під час сушіння флютингу в періоді нагріву на ПРМ зі швидкістю 400 м/хв та шириною полотна флютингу 4,25 м за різної тарифікації електроенергії (рисунок 4.9): 111 грн/тонну за двозонної тарифікації та 160 грн/тонну за тризонної тарифікації.

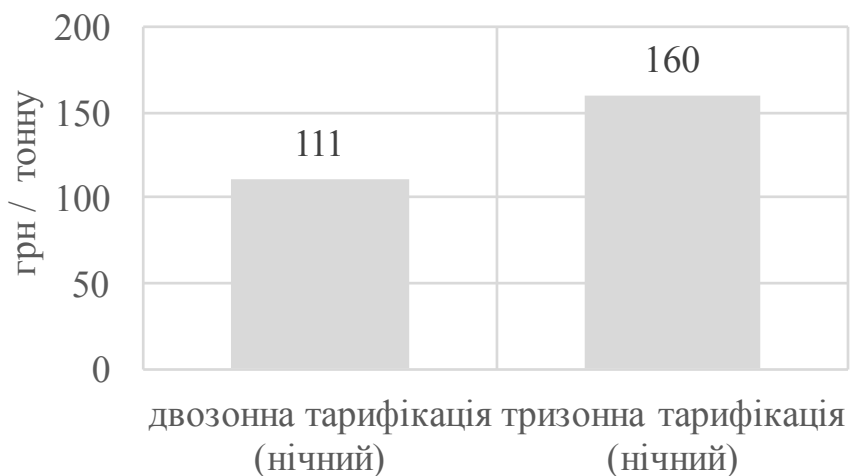
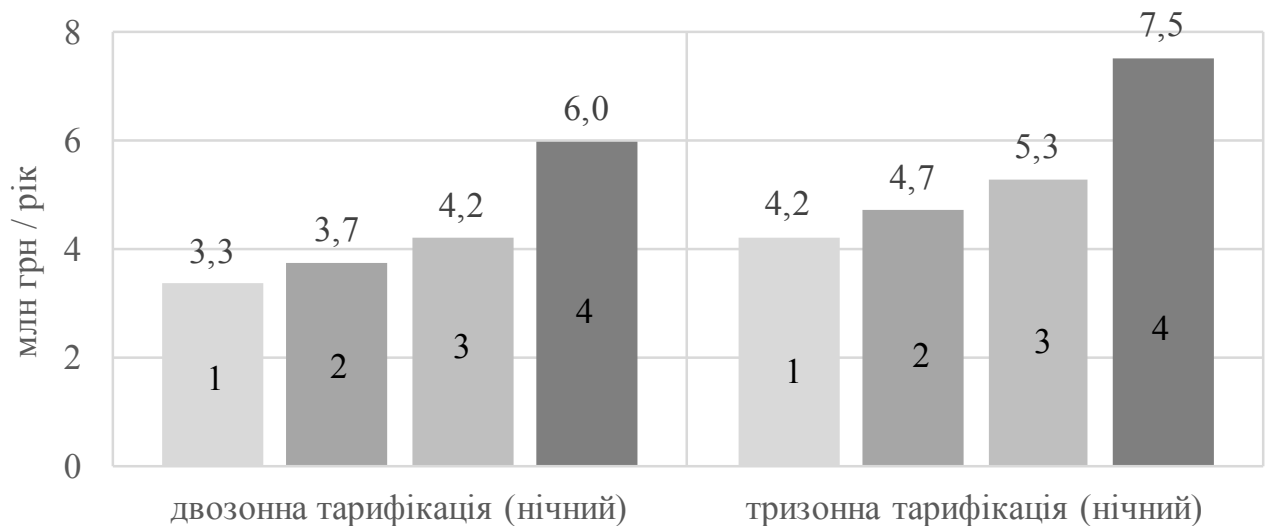


Рисунок 4.9 – Зменшення питомих затрат

Річний економічний ефект при застосуванні ІЧВ для сушіння флютингу в періоді нагрівання зображено на рисунку 4.10.

Визначено, що зі збільшенням маси квадратного метру флютингу річний економічний ефект від застосування енергії ІЧВ під час сушіння флютингу зростає (рисунок 4.10). Це пов'язано зі збільшенням кількості використаної енергії.

Найбільший економічний ефект спостерігається за тризонної тарифікації електроенергії в нічний період.



1 – 112 г/м²; 2 – 125 г/м²; 3 – 140 г/м²; 4 – 200 г/м²

Рисунок 4.10 – Економічний ефект під час сушіння флютингу за різної маси квадратного метру

Крім питомих витрат, встановлення ІЧ випромінювачів зменшить кількість сушильних циліндрів, вартість яких значно вища за сушильну установку з інфрачервоними випромінювачами. Орієнтовні вартості сушильного циліндру та еквівалентної за потужністю установки з ІЧ випромінювачами становить відповідно 800 тис. грн та 100 тис. грн.

4.3 Зменшення викидів продуктів згорання в навколишнє середовище

Під час виробництва водяної пари для роботи сушильних циліндрів ПРМ спалюють природний газ. Коли він згорає метан, основний компонент природного газу, розпадається на воду та вуглекислий газ (CO_2), що потім викидається в атмосферу. Відомо, що накопичення в атмосфері вуглекислого газу є однією з причин виникнення парникового ефекту [21].

При застосуванні ІЧВ для сушіння флютингу використовується електроенергія, що, здебільшого, виробляється екологічно чистим способом.

Зменшення обсягів утвореного вуглекислого газу завдяки застосування ІЧВ в періоді нагрівання під час сушіння флютингу показано на рисунку 4.11.

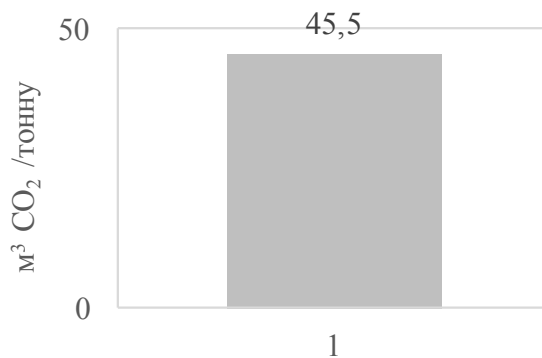
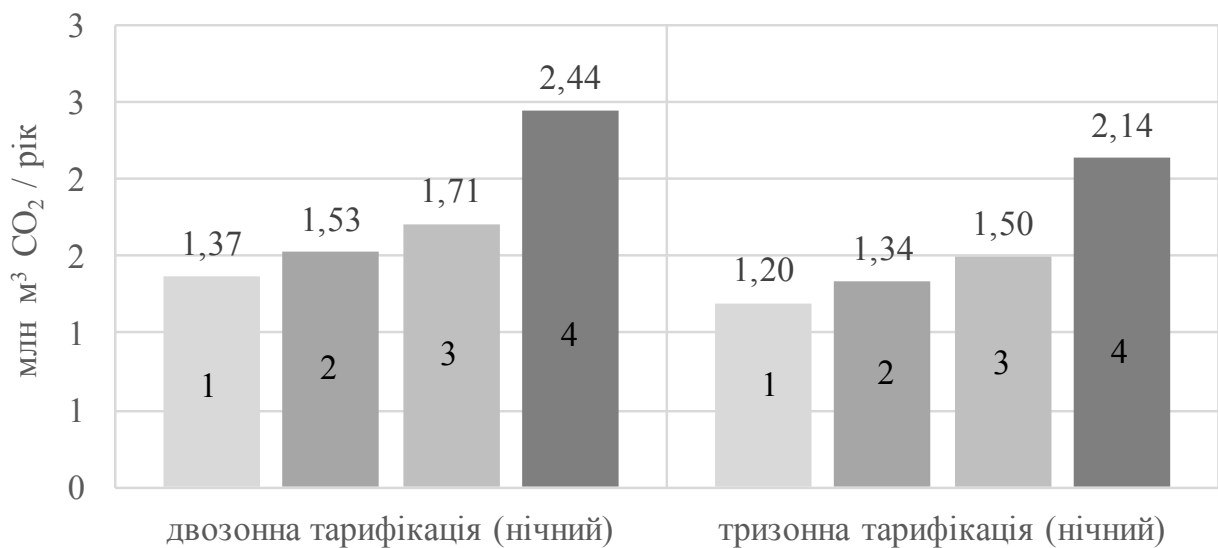


Рисунок 4.11 – Зменшення кількості викидів CO₂ в навколишнє середовище на тонну флютингу

Кількість викидів вуглекислого газу на тонну флютингу не залежить від маси квадратного метру та тарифікації електроенергії і становить 45,5 м³/тонну.

Зменшення обсягів утвореного вуглекислого газу завдяки застосування ІЧВ в періоді нагріву під час сушіння флютингу різної маси квадратного метру протягом року показано на рисунку 4.12. Розрахунок виконано для ПРМ, що працює зі швидкістю 400 м/хв та наведено в додатку Ж.



1 – 112 г/м²; 2 – 125 г/м²; 3 – 140 г/м²; 4 – 200 г/м²

Рисунок 4.12 – Зменшення кількості викидів CO₂ в навколишнє середовище протягом року

Як видно з рисунку 4.12, зменшення кількості викидів вуглекислого газу в навколишнє середовище протягом року найбільше під час сушіння флютингу в нічний період за тризонної тарифікації електроенергії і складе 2,44 млн м^3 /рік.

4.4 Висновки

1. На основі розробленої математичної моделі складено алгоритм розрахунку промислової установки сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ.

За цим алгоритмом для конкретних вихідних даних можна визначити довжину та площу промислової установки сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ та загальну кількість випромінювачів заданої потужності.

2. Для інтенсифікації нагрівання та сушіння флютингу запропоновано 4 пристрої з ІЧ випромінювачами, захищені патентами України на корисні моделі.

3. Встановлено, що питомі затрати під час сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ менші, ніж за контактного способу сушіння на типовій ПРМ в нічний час за двозонної тарифікації електроенергії (0,197 грн/МДж під час застосування ІЧВ та 0,325 грн/МДж за кондуктивного способу) та за тризонної тарифікації електроенергії (0,141 грн/МДж під час застосування ІЧВ та 0,325 грн/МДж за кондуктивного способу). Питомі затрати за цих тарифікацій складають 111 грн/тонну та 160 грн/тонну флютингу відповідно.

4. Встановлено рівень зменшення викидів вуглекислого газу в навколишнє середовище завдяки заміні контактного способу сушіння флютингу на сушильних циліндрах на типовій ПРМ на застосування енергії ІЧВ в період нагрівання (45 м^3 /тонну флютингу). Річний рівень зменшення викидів вуглекислого газу залежить від типу тарифікацій та маси квадратного метру флютингу, і для типової ПРМ складає від 1,2 млн м^3 /рік до 2,44 млн м^3 /рік.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено важливу науково-технічну задачу створення ефективного та екологічного способу сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання та розробку відповідного обладнання.

За результатами проведених досліджень зроблено наступні висновки:

1. Науково обґрунтовано доцільність використання енергії інфрачервоного випромінювання для сушіння флютингу.

2. Науково обґрунтовано фізичну та математичну моделі процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ.

3. Отримано нові кінетичні залежності процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ за різних технологічних параметрів процесу.

4. Встановлено вплив технологічних параметрів на інтенсивність процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ та надано рекомендації щодо вибору цих параметрів.

5. Експериментально визначено, що застосування ІЧВ сприяє інтенсифікації сушіння флютингу в періоді нагрівання та першому періоді сушіння.

6. На основі отриманих експериментальних результатів підтверджено адекватність математичної моделі сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ.

7. На основі встановлених кінетичних закономірностей та основних параметрів процесу сушіння флютингу розроблено алгоритм розрахунку сушильної установки з інфрачервоними випромінювачами.

8. Отримані кінетичні закономірності і основні параметри процесу сушіння флютингу із застосуванням ІЧВ дозволяють здійснювати проектування промислових процесів сушіння флютингу та ефективного обладнання для сушіння.

9. Встановлено питомі затрати електроенергії на сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ за різної тарифікації електроенергії та порівняно з затратами на використання водяної пари в сушильних циліндрах.

10. Показано, що застосування ІЧВ для сушіння флютингу зменшить витрати природного газу на виробництво водяної пари та дозволить зменшити викиди в атмосферу вуглекислого газу, що утворюються під час спалювання природного газу.

11. Результати дисертаційної роботи впроваджено у папероробному обладнанні, що виготовляє ТОВ ПТК “Вуглепром”, м. Дніпро.

12. Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв інженерно-хімічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Asensio C. Simulation of paper drying systems with incorporation of an experimental drum/paper thermal contact conductance relationship / C. Asensio // *Drying Technology: An International Journal*. – 1992. – Vol. 10. – № 4. – P. 1135-1137.
2. Asensio M. C. Theoretical drying study of single-tier versus conventional two-tiered dryer configurations / M.C. Asensio, J. Seyed-Yagoobi // *TAPPI Journal*. – 1992. – Vol. 75. – № 10. – P. 203-211.
3. Bedard N. Laboratory testing of radiant gas burners and electric infrared emitters / N. Bedard // *Experimental Heat Transfer*. – 1998. – Vol. 11. – P. 255-279.
4. Cepitis J. A mathematical model of paper drying / J. Cepitis // *Mathematical Modelling and Analysis*. – 2000. – Vol. 5. – P. 26-31.
5. Clarke A. E. Investigation of factors contributing to the deposition of contaminants on dryer cylinders / A. E. Clarke. – Georgia: Georgia Institute of Technology, 2007. – P. 112.
6. Dhib R. Derivation of a control oriented low order model of the dynamics of an infrared oven for the continuous drying of a thin sheet of material / R. Dhib, N. Theriem, A. D. Broadbent // *The canadian journal of chemical engineering*. – 1998. – Vol. 76. – P. 290-299.
7. Dhib R. Infrared drying: from process modeling to advanced process control / R. Dhib // *Drying Technology: An International Journal*. – 2007. – Vol. 25. – № 1. – P. 97-105.
8. Dümichen E Analysis of polyethylene microplastics in environmental samples, using a thermal decomposition method / E. Dümichen, A. K. Barthel, U. Braun et. al // *Water Research*. – 2015. – Vol. 85. – P. 451-457.
9. Fernandez M. L. Radiative drying model of porous materials / M. L. Fernandez, J. R. Howell // *Drying Technology: An International Journal*. – 1997. – Vol. 15. – № 10. – P. 2377-2399.

10. Ghodbanan S. Steady state modeling of multi-cylinder dryers in corrugating paper machine / S. Ghodbanan, R. Alizadeh, S. Shafiei // *Drying Technology: An International Journal*. – 2015. – Vol. 33. – № 12. – P. 1474-1490.
11. Heo C. H. Dynamic modeling of paper drying processes / C. H. Heo, H. Cho, Y.-K. Yeo // *Korean journal of chemical engineering*. – 2011. – Vol. 28. – № 8. – P. 1651-1657.
12. Hung D.V. Preserving the strength of corrugated cardboard under high humidity condition using nano-sized mists / D.V. Hung, Y. Nakano, F. Tanaka et. al // *Composites Science and Technology*. – 2010. – Vol. 70 –№ 14. – P. 2123-2127.
13. Hyukjae L. Temperature uniformity in water films and wet paper through spectrally selective infrared heating / H. Lee, R. F. Speyer, T. Patterson // *Drying Technology: An International Journal*. – 2003. – Vol. 21. – № 1. – P. 35-50.
14. Karlsson M. Static and dynamic modeling of cardboard drying part 2: theoretical model / M. Karlsson, S. Stenström // *Drying Technology: An International Journal*. – 2005. – Vol. 23. – № 1-2. – P. 143-163.
15. Kuang H.-De Study of heat and mass transfer during IR drying of paper / H.-De Kuang, J. Thibault, B. P. A. Grandjean, R. Chen // *Drying Technology: An International Journal*. – 1994. – Vol. 12. – № 3. – P. 545-575.
16. Lampinen M. J. Modeling and measurements of infrared dryers for coated paper / M. J. Lampinen, K. T. Ojala, E. Koski // *Drying Technology: An International Journal*. – 1991. – Vol. 9. – № 4. – P. 973-1017.
17. Lu T. Numerical and experimental investigation of paper drying: Heat and mass transfer with phase change in porous media / T. Lu, , S. Q. Shen // *Applied Thermal Engineering Applied Thermal Engineering*. – 2007. – Vol. 27. – № 8. – P. 1248-1258.
18. Marchevsky V. Kinetics of corrugated board flute drying with the use of infrared radiation / V. Marchevsky, O. Novokhat // *The Advanced Science Journal*. – Vol. 2015. – №6. – P. 69-72.

19. Marchevsky V. Paper drying process for corrugation (fluting) using radiant energy / V. Marchevsky, O. Novokhat, O. Tsepka // Ukrainian Journal of Food Science. – Vol. 2015. — №2. – P. 310-321.
20. Mathcad. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mathcad.com.ua/>
21. Meylan F. D. CO₂ utilization in the perspective of industrial ecology, an overview / F. D. Meylan, V. Moreau, S. Erkman // Journal of CO₂ Utilization. – 2015. – Vol. 12. – P. 101-108.
22. Nilsson L. Heat and mass transfer in multicylinder drying: Part I. Analysis of machine data / L. Nilsson // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2004. – Vol. 43. – № 12. – P. 1547-1553.
23. Nilsson L. Heat and mass transfer in multicylinder drying: Part II. Analysis of internal and external transport resistances / L. Nilsson // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2004. – Vol. 43. – № 12. – P. 1555-1560.
24. Pat. 687768 (EP), Cl.⁶ D 21 F 5/04. Drying sections of paper machine / Ahokas Matti (FI), Lehosvuo Risto (FI), Valmet paper machinery inc. (FI). – №95850107.4; application date 13.06.95; publication date 20.12.95.
25. Pat. № 0655528 A2 (EPO), Int. Cl.⁶ D21F 5/04. Methods in the drying of a paper web as well as dryer sections of a paper machine / Kerttula (FI), Yli-Kaupila (FI), Kaihovirta, (FI); applicant Valmet paper machinery inc. (FI). – 94118326.1; application date 22.11.94; publication date 31.05.95.
26. Pat. № 4900583 (US), Cl.⁶ B05D 3/06. Method of producing cast coated paper using near-infrared radiation / Tetsuya Hirabayashi (JP) , Mikio Takahashi (JP), Kanzaki Paper Mfg. Co. (JP). – 183659; application date 19.04.88; publication date 13.12.90.
27. Pat. № 4936025 (US), Int. Cl.⁵ F26B 7/00. Combination infrared and airborne drying of a web / Perttie Heikkila (FI); applicant Valmet paper machinery inc. (FI). – 343049; application date 25.04.1989; publication date 26.06.1990.

28. Pat. № 4942674 (US), Int. Cl.⁵ F26B 7/00. Method in the drying of a paper web or equivalent / Marrku Karlsson (FI); applicant Valmet paper machinery inc. (FI). – 313133; application date 15.12.1988; publication date 24.01.1989.

29. Pat. № 5230165 (US), Int. Cl.⁵ F26B 19/00. Dryer section / Rudolf Beisswanger (GE); applicant J. M. Voith GmbH (GE). – 862194; application date 02.04.1992; publication date 27.07.1993.

30. Pat. № 5494406 (US), Int. Cl.⁶ B05B 1/24. Coating device having infrared and suspension drying sections / Rudolf Beisswanger (GE); applicant J. M. Voith GmbH, (GE). – 862194; application date 02.04.1992; publication date 27.07.1993.

31. Pat. № 5592751 (US), Int. Cl.⁶ F26B 11/02. Dryer section having combination of single and double tier dryer groups / Adolf Guggemos (GE); Markus Oechsle (GE) applicant Voith Sulzer Papiermaschinen GmbH (GE). – 440087; application date 12.05.1995; publication date 14.01.1997.

32. Pat. № 5666744 (US), Int. Cl.⁶ F26B 3/34. Infrared paper drying machine and method for drying a paper web in an infrared paper drying machine / Benjamin A. Thorp (US) applicant James river corporation of Virginia (US). – 552123; application date 02.11.1995; publication date 16.09.1997.

33. Pat. № 5737848 US, Cl.⁶ F26B 11/02. Guide roll arrangement for paper machine drying section / Tri Chau-Huu, Albrecht Meinecke, Voith Sulzer Papiermaschinen GmbH (DE). – №617332; application date 18.03.96; publication date 14.04.98.

34. Pat. № 5756156 (US), Int. Cl.⁶ B05D 3/02. Method for producing surface treated paper and dry end of a paper machine/ Seppo Elijoki (FI), Heikki Ilvespää (FI), applicant Valmet Corporation (FI). – 705059; application date 29.08.1996; publication date 26.05.1998.

35. Pat. № 5771603 (US), Int. Cl.⁶ D21F 5/00. Dryer section / Gerard Kotitschke (GE), Hans-Peter Sollinger (Ge), Markus Oechsle (Ge), applicant Voith Sulzer Papiermaschinen GmbH (Ge). – 719390; application date 24.09.1996; publication date 30.05.1998.

36. Pat. № 9825421 (WO), Cl.⁶ D21F 5/04. Method and installation for drying of fibrous web / Lehtinen, Jukka Valmet Co. (FI). – №96845405.4; application date 12.11.94, publication date 15.04.03.

37. Pat. № DE20203105740U1 (US), Int. Cl.⁷ D21F7/006. Arrangement for severing the fiber web in the drying section of a fiber web machine and a corresponding device/ applicant Metso Paper Inc. (DE). – 03100377.5; application date 12.17.2013; publication date 01.30.2014.

38. Pat. № EP0770731A1 (EPO), Int. Cl.⁶ D21H 25/06, F26B 13/10. Method and device in drying of a coating on a paper web or equivalent / Heikkila Pertti (FI), Karlstedt Bertel (FI); applicant Valmet corporation (FI). – 96660067.8; application date 09.10.1996; publication date 02.05.1997.

39. Pat. № EP0943034B1 (EPO), Int. Cl.⁷ D21F 5/04. Method for drying of paper and dry end of a paper machine / Ahonen Pasi (FI), Kallioniemi Jaakko (FI); applicant Metso Paper, Inc. (FI). – 97946772.7; application date 02.12.1997; publication date 22.09.1999.

40. Pat. № EP1355003B1 (EPO), Int. Cl.⁶ D21F 5/04. Drying section / Schleidt Bernhard (AT), Rollenitz Erich (AT); applicant Voight Paper Holding GmbH and Co. (DE). – 03100377.5; application date 19.02.2003; publication date 22.10.2003.

41. Pat. № US6187137B1 (US), Int. Cl.⁷ D21H 27/00. Method of producing low density resilient webs / Frank Gerald Druecke (US); Shan Liang Chen (US); Alan Hermans (US); Sheng-Hsin (US); Richard Joseph Kamps (US); applicant Kimberly-Clark Worldwide, Inc. (US). – 08/961773; application date 31.10.1997; publication date 13.02.2001.

42. Pat. № US6412190B1 (US), Int. Cl.⁷ F26B 7/00. Infrared and hot air dryer combination / Ythomas Smith (US), applicant. – 09/859317; application date 17.03.2001; publication date 02.07.2002.

43. Pettersson M. Absorption of infrared radiation and radiation transfer mechanism in paper / M. Pettersson, S. Stenstrom // Journal of Pulp and Paper Science. – 1998. – Vol. 24. – No. 11. – P. 349 – 355.

44. Pettersson M. Modelling of an electric IR heater at transient and steady state conditions: Part I: model and validation / M. Pettersson, S. Stenström // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2000. – Vol. 43. – № 7. – P. 1209-1222.
45. Pettersson M. Modelling of an electric IR heater at transient and steady state conditions: Part II: modelling a paper dryer / M. Pettersson, S. Stenström // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2000. – Vol. 43. – № 7. – P. 1223-1232.
46. Pierrehumbert R.T. Infrared radiation and planetary temperature / R.T. Pierrehumbert // *Physics Today*. – 2011. – P. 33-38.
47. Ramaswamy S. Analysis of heat and mass transfer during drying of paper/board / S. Ramaswamy, R. A. Holm // *Drying Technology: An International Journal*. – 1999. – Vol. 17. – № 1-2. – P. 49-72.
48. Reardon S. A. A mathematical model for the simulation of paper drying energy consumption / S. A. Reardon, B.E. Hons. – Tasmania: University of Tasmania, 1994. – P. 314.
49. Reardon S. A. Friction, heat and mass transfer for paper drying / S. A. Reardon, M. R. Davis, P. E. Doe // *Heat Mass Transfer*. – 1998. – Vol. 41. – № 10. – P. 1313-1325.
50. Roonprasang K. Thermal analysis of multi-cylinder drying section with variant geometry / K. Roonprasang. – Dresden: Technical university of dresden, 2008. – P. 160.
51. Sanjabi F. Optimal Control of Continuous Infrared Dryers / F. Sanjabi, S. R. Upreti, R. Dhib // *Drying Technology: An International Journal*. – 2006. – Vol. 24. – № 5. – P. 581-587.
52. Seyed-Yagoobi J. An experimental study of gas-fired infrared drying of paper / J. Seyed-Yagoobi, J. W. Wirtz // *Drying Technology: An International Journal*. – 2001. – Vol. 19. – № 6. – P. 1099-1112.
53. Seyed-Yagoobi J. Drying of uncoated paper with gas-fired infrared emitters—optimum emitters' location within a paper machine drying section / J. Seyed-

Yagoobi, H. Noboa // *Drying Technology: An International Journal*. – 2003. – Vol. 21. – № 10. – P. 1897-1908.

54. Seyed-Yagoobi J. Experimental and Theoretical Study of Heating/Drying of Moist Paper Sheet with a Gas-Fired Infrared Emitter / J. Seyed-Yagoobi, A.N. Husain // *ASME Journal of Heat Transfer*. – 2001. – Vol. 123. – № 4. – P. 711-718.

55. Seyed-Yagoobi J. Heating/drying of paper sheet with gas-fired infrared emitters-pilot machine trials / J. Seyed-Yagoobi, S. J. Sikirica, K. M. Counts // *Drying Technology: An International Journal*. – 2001. – Vol. 19. – № 3-4. – P. 639-654.

56. Seyed-Yagoobi J. Heating/drying of uncoated paper with gas-fired and electric infrared emitters – fundamental understanding / J. Seyed-Yagoobi, H. Noboa // *Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004) (São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004)*. – Vol. B. – P. 1217-1224.

57. Shen S.Q. A model for paper drying computation based on the theory of heat and mass transfer in porous media / S.Q. Shen, T. Lu, S.F. Li // *China Pulp and Paper*. – 2003. – Vol. 22. – № 4. – P. 22–25.

58. Slätteke O. Modeling and control of the paper machine drying section / O. Slätteke. – Lund: Department of Automatic Control Lund University, 2006. – P. 247.

59. Soininen M. Modeling of web drying / M. Soininen // *Drying Technology: An International Journal*. – 1995. – Vol. 13. – № 4. – P. 823-866.

60. Stenströ S. Evaluation of the energy efficiencies for a gas heated industrial infrared paper dryer / S. Stenströ, M. Johansson // *Drying Technology: An International Journal*. – 1995. – Vol. 13. – № 5-7. – P. 1345-1358.

61. Vieira M. G. A. Energy efficiency and drying kinetics of recycled paper pulp / M. G. A. Vieira, L. Estrella, and S. C. S. Rocha // *Drying Technology: An International Journal*. – 2007. – Vol. 25. – № 10. – P. 1639-1848.

62. Weineisen H. Modeling drying and energy performance of industrial through-dryers / H. Weineisen, S. Stenströma // *Drying Technology: An International Journal*. – 2008. – Vol. 26. – № 6. – P. 776-785.

63. Wilhelmsson B. Heat and mass transfer coefficients in computer simulation of paper drying / B. Wilhelmsson, S. Stenstrom // *Drying Technology: An International Journal*. – 1995. – Vol. 13. – № 4. – P. 959-975.

64. Yeo Y.-K. Modeling of the drying process in paper plants / Y.-K. Yeo, K.-S. Hwang, S. C. Yi, H. Kang // *Korean journal of chemical engineering*. – 2004. – Vol. 21. – № 4. – P. 761-766.

65. Ахназарова С Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: Учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп.– М. : Высш. шк., 1985. – 327 с., ил.

66. Бойков Л. М. Факторы, влияющие на эффективность работы сушильных установок бумагоделательных и картоноделательных машин / Л.М. Бойков, Н.С. Нечаев // *Технико-технологические проблемы сервиса*. – 2011. –Т. 1. – № 15. – С. 26-28.

67. ГОСТ 7376-89 Картон гофрированный. Общие технические условия.

68. Дешко В. И. Исследование теплообмена при кристаллизации фтористого кальция/ В. И. Дешко, А. Я. Карвацкий // *Промышленная теплотехника*. — 1988. — Т. 10, №1.— С. 60–65.

69. Дешко В. І. Математичне моделювання та експериментальні дослідження складного теплообміну при рості кристалів: монографія / В. І. Дешко, А. Я. Карвацький, Ю. В. Лохманець, О. М. Кудін, О. В. Колесніков; НАН України, Ін-т сцинтиляц. матеріалів. - Харків : ІСМА, 2012. — 247 с.

70. ДСТУ 7377-85 Бумага для гофрирования. Технические условия.

71. Жученко А. И. Постановка задачи оптимального управления процессом прогрева бумажного полотна в сушильной части бумагоделательной машины / А. И. Жученко, Е. С. Черёпкин // *Автоматизация технологических и бизнес-процесов*. – 2015 – №7(1). – С. 25 – 30.

72. Жучков П. А. Тепловые процессы в целлюлозно-бумажном производстве. – М: Лесн. пром-сть, 1978. – 408 с.

73. Загребельна Ю. І. Застосування енергії інфрачервоного випромінювання для нагрівання й сушіння паперу / Ю. І. Загребельна,

В. М. Марчевський // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2010. — № 2(6). — С. 25-27.

74. Загребельна Ю. І. Сушіння паперу й картону інфрачервоним випромінюванням / Ю. І. Загребельна, В. М. Марчевський // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2011. — № 1(7). — С. 43-45.

75. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Изд. 2-е испр. и доп. Л.: Наука, Ленинградское отд., 1967. 88 с.

76. Зигель Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл ; пер. с англ. ; под ред. Б. А. Хрусталева. — М. : Мир, 1975. — 934 с.

77. Иванов С. Н. Технология бумаги : [учеб. пособ.] / С.Н. Иванов. — М.: Гослесбумиздат, 1960. — 719 с.

78. Инфракрасные обогреватели: принцип действия, классификация, обзор электрических, газовых, дизельных ИК-моделей [Электронный ресурс]. — Назва з екрану. — Режим доступу: <http://master-forum.ru/infrakrasnye-obogrevateli-printsip-dejstviya-klassifikatsiya-obzor-elektricheskikh-gazovyh-dizelnyh-ik-obogrevatelej/>

79. Исаченко В. П. Теплопередача : учебн. для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. — М. : Энергоиздат, 1981. — 416 с.

80. Карвацький А. Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів [Електронний ресурс]: навч. посіб. — К.: НТУУ «КПІ», 2015. — 391 с.: іл. — Бібліогр.: с. 385–387. — Режим доступу до журн.: <http://cpsm.kpi.ua/publikatsiji/knigi/957-metod-skinchennikh-elementiv-u-zadachakh-mekhaniki-sutsilnikh-seredovishch-programna-realizatsiya-ta-vizualizatsiya-rezultativ.html>

81. Карвацький А. Я. Моделювання енергозберігаючих регламентів промислового обладнання: навч. посіб. — К.: НТУУ «КПІ», 2014. — 234 с.

82. Колчина И.А. Рынок картона в Украине (состояние и проблемы) / И.А. Колчина // Упаковка. — 2013. — № 2. — С. 22-26.

83. Корнієнко Я. М. Процеси та обладнання хімічної технології : підручник: [у 2 ч.]. Ч. 1 / Я. М. Корнієнко, Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонок, В. Л. Ракицький, Г. Л. Рябцев; МОНМС України, НТУУ "Київ. політехн. ін-т". - К., 2011. - 300 с. - Бібліогр.: 32 назв - укр.

84. Лыков А. В. Теория сушки / А. В. Лыков – М., Энергия, 1968. – 472 с.

85. Марчевський В. М. Інфрачервоне випромінювання в процесі сушіння паперу / В. М. Марчевський, О. А. Новохат // Наукові праці ОНАХТ. – 2008. – №32. – Т2. – С. 42-44.

86. Марчевський В. М. Інфрачервоне випромінювання в процесі сушіння паперу та зменшення викидів в атмосферу / В. М. Марчевський, О. А. Новохат // Екологія. Людина. Суспільство: XI міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених (Київ, Україна, 13—18 травня, 2008): збірник тез доповідей — К. : НТУУ «КПІ», 2008. — С. 188-189.

87. Марчевський В. М. Інфрачервоне випромінювання в процесі сушіння паперу та зменшення викидів в атмосферу / В. М. Марчевський, О. А. Новохат // Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: III всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених (Київ, Україна, 25 квітня, 2008): зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2008. — С. 29.

88. Марчевський В. М. Інфрачервоне нагрівання і сушіння паперу й картону / В. М. Марчевський, О. А. Новохат // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2011. — № 2(8). — С. 42-44.

89. Марчевський В. М. Кінетика інфрачервоного нагрівання й сушіння паперу / В.М. Марчевський, О. А. Новохат // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2012. — № 1(9). — С. 44-46.

90. Марчевський В. М. Кінетичні закономірності нагріву та сушіння паперу із застосуванням інфрачервоного випромінювання / В. М. Марчевський, О. А. Новохат // Наукові праці ОНАХТ. – 2009. – №35. – Т2. – С. 79-81.

91. Марчевський В. М. Процес сушіння паперу з розробкою відповідного обладнання // В. М. Марчевський, О. А. Новохат // Проблеми

пакувальної індустрії: IX міжн. наук.-практ. конф. (Київ, Україна, 4 листопада 2008): зб. тез доп. – К.: НУХТ, 2008. – С. 8-10.

92. Марчевський В. М. Процес сушіння паперу із застосуванням інфрачервоного випромінювання / В. М. Марчевський, О. А. Новохат // Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: VI всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених (Київ, Україна, 15-16 квітня 2010): зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2010. — С. 10-11.

93. Марчевський В. М. Сушіння санітарно-гігієнічного паперу з використанням інфрачервоного випромінювання/ В. М. Марчевський, О. А. Новохат, Л. Г. Воронін, О. О. Татарчук // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2015. — № 1(14). — С. 29-31.

94. Марчевський В.М. Інтенсифікація процесу сушіння паперу /В. М. Марчевський В.М., О. А. Новохат // Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: V всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених (Київ, Україна, 5 листопада 2009): зб. тез доп. — К.: НТУУ «КПІ», 2009. — С. 16-17.

95. Новохат О. А. Аналіз результатів дослідження процесу сушіння паперу із застосуванням інфрачервоного випромінювання /Новохат О. А.// Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: I міжн. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених (Київ, Україна, 1-4 листопада 2011): зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2011. — С. 114-115.

96. Новохат О. А. Дослідження роботи електричного інфрачервоного випромінювача для сушіння санітарно-гігієнічного паперу / О. А. Новохат, О. О. Татарчук // Наукові праці ОНАХТ. — 2014. —45(2). – С. — 90-93.

97. Новохат О. А. Застосування інфрачервоного випромінювання в процесі сушіння паперу / О. А. Новохат // Наукові праці ОНАХТ. – 2011. – №39. – Т2. – С. 249-251.

98. Новохат О. А. Застосування інфрачервоного випромінювання при сушінні паперу на папероробній машині / О. А. Новохат // Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: VIII всеукр. наук.-практ.

конф. студ., аспірантів та молодих вчених (Київ, Україна, 13 квітня 2011): зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2011. — С. 110-111.

99. Новохат О. А. Модернізація сушильної частини картоноробної машини / О. А. Новохат, А. С. Галстян // Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: VI всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених (Київ, Україна, 15-16 квітня 2010): зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2010. — С. 3-4.

100. Новохат О. А. Перша привідна група сушильної частини папероробної машини /О. А. Новохат, О. О. Татарчук // Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: XII всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених (Київ, Україна, 15-16 травня 2013): зб. тез доп. — К.: НТУУ «КПІ», 2013. — С. 99-100.

101. Оцисик М. Н. Сложный теплообмен / М. Н. Оцисик ; пер. с англ. ; под ред. Н. А. Анфимова. — М. : Мир, 1976. — 616 с.

102. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии 10-ое изд. // К. Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков / Л.:Химия, 1987 - 576 с.

103. Пат. № 100580 Україна, МПК (2015.01) D 21 F 5/00. Пристрій для сушіння паперового чи іншого волокнистого полотна / Новохат О. А., Татарчук О. О. – заявл. 23.03.2015; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14.

104. Пат. № 35068 Україна, МПК (2008) D 21 F 5/04. Сушильна секція / Марчевський В. М., Новохат О. А. - №u2008 05439; заявл. 25.04.2008; опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16.

105. Пат. № 58917 Україна, МПК (2011) D 21 F 5/00. Пристрій для нагрівання паперу інфрачервоним випромінюванням / Марчевський В. М., Загребельна Ю.І., Новохат О.А.- заявл. 25.10.2010; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8.

106. Пат. № 98553U Україна, МПК (2015.01) D21F 5/00. Ковпак швидкісного сушіння / І.М.Ждановський, В.М. Марчевський (UA), – заявл. 25.10.2010; опубл. 26.04.2011, Бюл.№ 8.

107. Пат. №105956 Україна, МПК (2016.01) D21F 5/00. Сушильна частина папероробної машини / Карпенко К.О., Новохат О.А.- опубл. 11.04.2016, Бюл. № 7.
108. Перри Д.Г. Справочник инженера-химика. Т 1. – Л. : Химия, 1969. – 504 с.
109. Пилимчук М. І. Основи наукових досліджень: Підручник / М. І. Пилимчук, А. С. Григор'єв, В. В. Шостак // – К.: Знання, 2007. – 270 с.
110. Самарский А. А. Разностные методы решения задач газовой динамики / А. А. Самарский, Ю. П. Попов. — М. : Наука, 1980. — 352 с.
111. Сергеев О. А. Теплофизические свойства полупрозрачных материалов / О. А. Сергеев, А. А. Мень. — Изд-во стандартов, 1977. — 288 с.
112. Тарифы на природный газ [Електронний ресурс]. – Назва з екрану. – Режим доступу: <http://index.minfin.com.ua/tarif/gas/>
113. Тарифы на электрическую энергию (кроме населения) [Електронний ресурс]. – Назва з екрану. – Режим доступу: <http://kyivenergo.ua/ru/ee-company/tarifi>
114. Татарчук О. О. Пристрій для інтенсифікації сушіння паперу / О. О. Татарчук, В. М. Марчевський, О. А. Новохат // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: V міжн. наук.-практ. конф. студ., аспірантів і молодих вчених (Київ, Україна, 20-23 листопада 2013): зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2013. — С. 72-73.
115. Упаковка из картона в мире и Украине (состояние и тенденции развития) // Упаковка. – 2014. – № 3. – С. 53-55.
116. Федотова М. Гофро-ликбез / М. Федотова, О. Новосад // Картон и гофрокартон. – 2003. – № 5. – Режим доступу до журн.: http://www.kig.com.ua/index.php?menu_id=1&submenu_id=4&article_type_id=3&article_id=91
117. Фляте Д. М. Свойства бумаги. Издание 3-е / Д. М. Фляте / – М.: Лесн. пром-сть, 1986. – 680 с.

118. Фляте Д. М. Технология бумаги. Учебник для вузов / Д. М. Фляте / – М.: Лесн. пром-сть, 1988. – 440 с.
119. Чичаев В. А. Оборудование целлюлозно-бумажного производства. Т. 2 / В. А. Чичаев и др. // – Лесная промышленность, 1981. – 264.
120. Шервуд Т.К. Сушка твердых тел. – Гослесиздат, 1936. – 282.

Додаток А

Результати експериментального дослідження процесу нагрівання робочої поверхні дослідного інфрачервоного випромінювача

Досліджено процес нагрівання дослідного ІЧ випромінювача ЕСН-4.

Дослідження здійснювали за наступних умов:

- температура навколишнього середовища, °С 24
- відносна вологість повітря, % 70
- початкова температура поверхні ІЧ випромінювача, °С 24

Таблиця А.1 – Нагрівання робочої поверхні ІЧ випромінювача

Час процесу, с	Температура, °С	Час процесу, с	Температура, °С	Час процесу, с	Температура, °С
0	18	115	218	230	422
5	18,5	120	229	235	429
10	21,3	125	240	240	434
15	24,5	130	251	245	440
20	30,6	135	262	250	443
25	37,5	140	273	255	448
30	46,7	145	284	260	451
35	55,1	150	294	265	455
40	64,2	155	304	270	458
45	73,5	160	314	275	462
50	83,7	165	324	280	466
55	95,8	170	334	285	469
60	105,5	175	343	290	472
65	116,3	180	352	295	475
70	127,1	185	361	300	479
75	137,5	190	370	305	481
80	147,5	195	379	310	484
85	158,8	200	387	315	486
90	168,4	205	393	320	489
95	178	210	400	325	490
100	187,3	215	406	330	492
105	196,7	220	411	335	495
110	207	225	418	340	497

Продовження таблиці А.1

Час процесу, с	Температура, °С	Час процесу, с	Температура, °С	Час процесу, с	Температура, °С
345	499	520	532	695	546
350	501	525	532	700	546
355	503	530	533	705	546
360	505	535	533	710	546
365	506	540	534	715	546
370	508	545	535	720	546
375	510	550	535	725	546
380	511	555	535	730	547
385	513	560	536	735	547
390	513	565	537	740	548
395	514	570	537	745	548
400	515	575	538	750	548
405	516	580	538	755	548
410	516	585	539	760	549
415	518	590	539	765	549
420	519	595	539	770	549
425	520	600	540	775	549
430	521	605	540	780	549
435	521	610	540	785	550
440	523	615	540	790	549
445	524	620	541	795	548
450	524	625	541	800	549
455	525	630	541	805	549
460	525	635	541	810	549
465	527	640	541	815	549
470	527	645	541	820	548
475	528	650	542	825	549
480	528	655	543	830	549
485	529	660	543	835	549
490	529	665	543	840	549
495	529	670	544	845	549
500	530	675	544	850	549
505	530	680	545	855	549
510	530	685	545	860	550
515	531	690	546	865	550

Продовження таблиці А.1

Час процесу, с	Температура, °C	Час процесу, с	Температура, °C	Час процесу, с	Температура, °C
870	550	1045	552	1220	551
875	550	1050	552	1225	552
880	551	1055	552	1230	552
885	550	1060	553	1235	552
890	550	1065	553	1240	552
895	550	1070	552	1245	553
900	550	1075	552	1250	553
905	550	1080	551	1255	553
910	551	1085	551	1260	553
915	551	1090	551	1265	553
920	550	1095	551	1270	553
925	551	1100	551	1275	553
930	551	1105	551	1280	553
935	550	1110	552	1285	553
940	551	1115	551	1290	552
945	551	1120	551	1295	552
950	551	1125	551	1300	552
955	551	1130	551	1305	552
960	551	1135	551	1310	552
965	551	1140	550		
970	552	1145	550		
975	552	1150	550		
980	552	1155	550		
985	552	1160	550		
990	553	1165	551		
995	553	1170	551		
1000	553	1175	550		
1005	553	1180	551		
1010	553	1185	551		
1015	553	1190	550		
1020	553	1195	551		
1025	553	1200	551		
1030	553	1205	551		
1035	552	1210	551		
1040	552	1215	551		

Додаток Б

Результати експериментальних досліджень процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання

Б.1 Дослідження впливу густини теплового потоку на кінетику сушіння флютингу

Дослідні зразки флютингу марки Б-1 з масою квадратного метру 125 г/м^2 за ДСТУ 7377-85.

Дослідження здійснювали за наступних умов:

- температура навколишнього середовища, °C 24
- відносна вологість повітря, % 70
- початкова температура зразків флютингу, °C 24

Таблиця Б.1 – Кінетичні закономірності сушіння

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °C	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °C
1	0	3,779	1,730	0,000	24	1	20	3,65	1,637	0,007	58,3
1	1	3,776	1,728			1	21	3,641	1,631		
1	2	3,776	1,728			1	22	3,63	1,623		
1	3	3,769	1,723			1	23	3,619	1,615		
1	4	3,767	1,722			1	24	3,606	1,605		
1	5	3,762	1,718	0,002	32,3	1	25	3,597	1,599	0,008	59,1
1	6	3,76	1,717			1	26	3,584	1,590		
1	7	3,754	1,712			1	27	3,574	1,582		
1	8	3,747	1,707			1	28	3,561	1,573		
1	9	3,741	1,703			1	29	3,544	1,561		
1	10	3,736	1,699	0,004	45,2	1	30	3,535	1,554	0,009	59,5
1	11	3,729	1,694			1	31	3,519	1,543		
1	12	3,719	1,687			1	32	3,513	1,538		
1	13	3,715	1,684			1	33	3,499	1,528		
1	14	3,706	1,678			1	34	3,486	1,519		
1	15	3,698	1,672	0,005	51,8	1	35	3,478	1,513	0,008	60,1
1	16	3,691	1,667			1	36	3,458	1,499		
1	17	3,682	1,660			1	37	3,454	1,496		
1	18	3,673	1,654			1	38	3,434	1,481		
1	19	3,658	1,643			1	39	3,419	1,470		

Продовження таблиці Б.1

Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
1	40	3,41	1,464	0,010	59,9	1	82	2,859	1,066		
1	41	3,401	1,457			1	83	2,843	1,054		
1	42	3,391	1,450			1	84	2,832	1,046		
1	43	3,371	1,436			1	85	2,821	1,038	0,010	65,2
1	44	3,358	1,426			1	86	2,806	1,027		
1	45	3,345	1,417	0,009	61,2	1	87	2,797	1,021		
1	46	3,334	1,409			1	88	2,78	1,009		
1	47	3,328	1,405			1	89	2,768	1,000		
1	48	3,31	1,392			1	90	2,759	0,993	0,009	66,4
1	49	3,296	1,382			1	91	2,745	0,983		
1	50	3,287	1,370	0,009	62	1	92	2,734	0,975		
1	51	3,271	1,363			1	93	2,719	0,965		
1	52	3,257	1,353			1	94	2,704	0,954		
1	53	3,248	1,347			1	95	2,693	0,946	0,010	66,7
1	54	3,234	1,337			1	96	2,679	0,936		
1	55	3,223	1,329	0,008	62,8	1	97	2,669	0,928		
1	56	3,209	1,319			1	98	2,654	0,918		
1	57	3,197	1,310			1	99	2,639	0,907		
1	58	3,181	1,298			1	100	2,628	0,899	0,009	68,5
1	59	3,17	1,290			1	101	2,617	0,891		
1	60	3,155	1,280	0,010	63,4	1	102	2,606	0,883		
1	61	3,137	1,267			1	103	2,588	0,870		
1	62	3,131	1,262			1	104	2,577	0,862		
1	63	3,113	1,249			1	105	2,564	0,853	0,009	67,8
1	64	3,106	1,244			1	106	2,55	0,842		
1	65	3,091	1,233	0,009	62,4	1	107	2,537	0,833		
1	66	3,075	1,222			1	108	2,526	0,825		
1	67	3,063	1,213			1	109	2,515	0,817		
1	68	3,05	1,204			1	110	2,502	0,808	0,009	67,8
1	69	3,038	1,195			1	111	2,484	0,795		
1	70	3,026	1,186	0,009	64	1	112	2,471	0,785		
1	71	3,008	1,173			1	113	2,463	0,780		
1	72	3	1,168			1	114	2,452	0,772		
1	73	2,984	1,156			1	115	2,432	0,757	0,010	66,6
1	74	2,968	1,145			1	116	2,421	0,749		
1	75	2,953	1,134	0,011	64,7	1	117	2,407	0,739		
1	76	2,934	1,120			1	118	2,395	0,730		
1	77	2,926	1,114			1	119	2,382	0,721		
1	78	2,912	1,104			1	120	2,368	0,711	0,009	69,1
1	79	2,898	1,094			1	121	2,35	0,698		
1	80	2,889	1,087	0,009	64,9	1	122	2,345	0,694		
1	81	2,874	1,077			1	123	2,327	0,681		

Продовження таблиці Б.1

Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
1	124	2,318	0,675			1	166	1,86	0,344		
1	125	2,306	0,666	0,009	69,9	1	167	1,849	0,336		
1	126	2,289	0,654			1	168	1,841	0,330		
1	127	2,28	0,647			1	169	1,835	0,326		
1	128	2,266	0,637			1	170	1,825	0,319	0,006	99,4
1	129	2,254	0,629			1	171	1,822	0,316		
1	130	2,241	0,619	0,009	69,4	1	172	1,813	0,310		
1	131	2,232	0,613			1	173	1,807	0,306		
1	132	2,224	0,607			1	174	1,802	0,302		
1	133	2,209	0,596			1	175	1,792	0,295	0,005	111,2
1	134	2,197	0,587			1	176	1,785	0,290		
1	135	2,178	0,574	0,009	72,4	1	177	1,78	0,286		
1	136	2,167	0,566			1	178	1,771	0,280		
1	137	2,158	0,559			1	179	1,765	0,275		
1	138	2,143	0,548			1	180	1,757	0,270	0,005	126,4
1	139	2,13	0,539			1	181	1,752	0,266		
1	140	2,12	0,532	0,008	70,2	1	182	1,744	0,260		
1	141	2,107	0,522			1	183	1,735	0,254		
1	142	2,099	0,517			1	184	1,734	0,253		
1	143	2,083	0,505			1	185	1,724	0,246	0,005	125,2
1	144	2,072	0,497			1	186	1,724	0,246		
1	145	2,06	0,488	0,009	72,7	1	187	1,718	0,241		
1	146	2,055	0,485			1	188	1,708	0,234		
1	147	2,041	0,475			1	189	1,705	0,232		
1	148	2,025	0,463			1	190	1,701	0,229	0,003	132,8
1	149	2,02	0,460			1	191	1,698	0,227		
1	150	2,005	0,449	0,008	72,8	1	192	1,693	0,223		
1	151	2,001	0,446			1	193	1,687	0,219		
1	152	1,989	0,437			1	194	1,682	0,215		
1	153	1,976	0,428			1	195	1,68	0,214	0,003	142
1	154	1,967	0,421			1	196	1,674	0,210		
1	155	1,952	0,410	0,008	72,9	1	197	1,663	0,202		
1	156	1,953	0,411			1	198	1,663	0,202		
1	157	1,934	0,397			1	199	1,653	0,194		
1	158	1,927	0,392			1	200	1,653	0,194	0,004	145,8
1	159	1,921	0,388			1	201	1,648	0,191		
1	160	1,91	0,380	0,006	84,8	1	202	1,638	0,184		
1	161	1,903	0,375			1	203	1,637	0,183		
1	162	1,897	0,371			1	204	1,637	0,183		
1	163	1,881	0,359			1	205	1,634	0,181	0,003	152,8
1	164	1,878	0,357			1	206	1,628	0,176		
1	165	1,867	0,349	0,006	95,8	1	207	1,623	0,173		

Продовження таблиці Б.1

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
1	208	1,618	0,169			1	250	1,487	0,074	0,002	154,4
1	209	1,613	0,165			1	251	1,484	0,072		
1	210	1,613	0,165	0,003	153,3	1	252	1,484	0,072		
1	211	1,607	0,161			1	253	1,481	0,070		
1	212	1,606	0,160			1	254	1,478	0,068		
1	213	1,605	0,160			1	255	1,472	0,064	0,002	155,8
1	214	1,596	0,153			1	256	1,473	0,064		
1	215	1,591	0,150	0,003	155,6	1	257	1,471	0,063		
1	216	1,591	0,150			1	258	1,468	0,061		
1	217	1,587	0,147			1	259	1,463	0,057		
1	218	1,582	0,143			1	260	1,459	0,054	0,002	160,2
1	219	1,577	0,139			1	261	1,465	0,059		
1	220	1,577	0,139	0,002	158,8	1	262	1,46	0,055		
1	221	1,573	0,137			1	263	1,454	0,051		
1	222	1,567	0,132			1	264	1,457	0,053		
1	223	1,565	0,131			1	265	1,451	0,048	0,001	159,3
1	224	1,559	0,126			1	266	1,451	0,048		
1	225	1,554	0,123	0,003	152,3	1	267	1,451	0,048		
1	226	1,551	0,121			1	268	1,451	0,048		
1	227	1,551	0,121			1	269	1,444	0,043		
1	228	1,546	0,117			1	270	1,446	0,045	0,001	159,4
1	229	1,542	0,114			1	271	1,441	0,041		
1	230	1,538	0,111	0,002	152,7	1	272	1,441	0,041		
1	231	1,538	0,111			1	273	1,434	0,036		
1	232	1,533	0,108			1	274	1,433	0,035		
1	233	1,532	0,107			1	275	1,437	0,038	0,001	161,1
1	234	1,532	0,107			1	276	1,432	0,035		
1	235	1,524	0,101	0,002	156,6	1	277	1,428	0,032		
1	236	1,523	0,100			1	278	1,428	0,032		
1	237	1,523	0,100			1	279	1,428	0,032		
1	238	1,52	0,098			1	280	1,425	0,030	0,002	159,2
1	239	1,519	0,098			1	281	1,423	0,028		
1	240	1,518	0,097	0,001	160,9	1	282	1,417	0,024		
1	241	1,51	0,091			1	283	1,419	0,025		
1	242	1,51	0,091			1	284	1,42	0,026		
1	243	1,51	0,091			1	285	1,42	0,026	0,001	161,4
1	244	1,506	0,088			1	286	1,418	0,025		
1	245	1,5	0,084	0,003	158,1	1	287	1,415	0,022		
1	246	1,496	0,081			1	288	1,41	0,019		
1	247	1,494	0,079			1	289	1,412	0,020		
1	248	1,49	0,077			1	290	1,411	0,017	0,002	159,8
1	249	1,489	0,076			1	291	1,41	0,019		

Продовження таблиці Б.1

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
1	292	1,41	0,019			2	17	3,743	1,632		
1	293	1,41	0,019			2	18	3,727	1,621		
1	294	1,41	0,019			2	19	3,713	1,611		
1	295	1,41	0,019	0,002	160,9	2	20	3,702	1,603	0,009	63,4
1	296	1,408	0,017			2	21	3,687	1,593		
1	297	1,406	0,016			2	22	3,674	1,584		
1	298	1,4	0,012			2	23	3,657	1,572		
1	299	1,4	0,012			2	24	3,642	1,561		
1	300	1,4	0,012	0,001	160,7	2	25	3,631	1,553	0,010	65,3
1	301	1,4	0,012			2	26	3,614	1,541		
1	302	1,4	0,012			2	27	3,603	1,534		
1	303	1,4	0,012			2	28	3,585	1,521		
1	304	1,397	0,009			2	29	3,57	1,511		
1	305	1,399	0,011	0,000	157,9	2	30	3,559	1,503	0,010	66,7
1	306	1,4	0,012			2	31	3,541	1,490		
1	307	1,394	0,007			2	32	3,527	1,480		
1	308	1,393	0,007			2	33	3,509	1,468		
1	309	1,393	0,007			2	34	3,492	1,456		
1	310	1,393	0,007	0,001	157,9	2	35	3,477	1,445	0,012	66,9
1	311	1,393	0,007			2	36	3,461	1,434		
1	312	1,387	0,002			2	37	3,448	1,425		
1	313	1,39	0,004			2	38	3,43	1,412		
1	314	1,389	0,004			2	39	3,411	1,399		
1	315	1,389	0,004	0,001	157,1	2	40	3,398	1,390	0,011	67,1
1	316	1,384	0,000			2	41	3,382	1,378		
2	0	3,865	1,718	0,000	16,7	2	42	3,37	1,370		
2	1	3,863	1,717			2	43	3,352	1,357		
2	2	3,858	1,713			2	44	3,331	1,342		
2	3	3,855	1,711			2	45	3,317	1,333	0,011	67,3
2	4	3,851	1,708			2	46	3,301	1,321		
2	5	3,849	1,707	0,002	38,3	2	47	3,289	1,313		
2	6	3,84	1,700			2	48	3,269	1,299		
2	7	3,833	1,695			2	49	3,248	1,284		
2	8	3,831	1,694			2	50	3,239	1,278	0,011	68,1
2	9	3,82	1,686			2	51	3,221	1,265		
2	10	3,814	1,682	0,005	52,9	2	52	3,208	1,256		
2	11	3,804	1,675			2	53	3,187	1,241		
2	12	3,797	1,670			2	54	3,168	1,228		
2	13	3,784	1,661			2	55	3,152	1,217	0,012	68,6
2	14	3,774	1,654			2	56	3,133	1,203		
2	15	3,765	1,648	0,007	59,1	2	57	3,12	1,194		
2	16	3,751	1,638			2	58	3,106	1,184		

Продовження таблиці Б.1

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
2	59	3,083	1,168			2	101	2,39	0,681		
2	60	3,069	1,158	0,012	69	2	102	2,375	0,670		
2	61	3,054	1,148			2	103	2,356	0,657		
2	62	3,039	1,137			2	104	2,343	0,648		
2	63	3,018	1,122			2	105	2,323	0,634	0,012	73,6
2	64	3	1,110			2	106	2,306	0,622		
2	65	2,991	1,103	0,011	67,8	2	107	2,292	0,612		
2	66	2,97	1,089			2	108	2,271	0,597		
2	67	2,959	1,081			2	109	2,261	0,590		
2	68	2,935	1,064			2	110	2,241	0,576	0,012	76,8
2	69	2,919	1,053			2	111	2,223	0,563		
2	70	2,907	1,048	0,011	69,2	2	112	2,211	0,555		
2	71	2,887	1,030			2	113	2,197	0,545		
2	72	2,874	1,021			2	114	2,182	0,534		
2	73	2,856	1,008			2	115	2,163	0,521	0,011	78,3
2	74	2,834	0,993			2	116	2,147	0,510		
2	75	2,824	0,986	0,012	69,7	2	117	2,135	0,501		
2	76	2,8	0,969			2	118	2,117	0,489		
2	77	2,788	0,961			2	119	2,106	0,481		
2	78	2,77	0,948			2	120	2,091	0,470	0,010	79,2
2	79	2,754	0,937			2	121	2,074	0,459		
2	80	2,74	0,927	0,012	69,6	2	122	2,061	0,449		
2	81	2,718	0,911			2	123	2,046	0,439		
2	82	2,705	0,902			2	124	2,033	0,430		
2	83	2,687	0,890			2	125	2,02	0,421	0,010	86,3
2	84	2,672	0,879			2	126	2,004	0,409		
2	85	2,656	0,868	0,012	70,8	2	127	1,993	0,402		
2	86	2,64	0,857			2	128	1,978	0,391		
2	87	2,628	0,848			2	129	1,969	0,385		
2	88	2,609	0,835			2	130	1,956	0,376	0,009	91,7
2	89	2,591	0,822			2	131	1,946	0,368		
2	90	2,576	0,812	0,011	69,5	2	132	1,94	0,364		
2	91	2,558	0,799			2	133	1,925	0,354		
2	92	2,548	0,792			2	134	1,921	0,351		
2	93	2,526	0,776			2	135	1,905	0,340	0,007	102,5
2	94	2,515	0,769			2	136	1,893	0,331		
2	95	2,494	0,754	0,012	69,9	2	137	1,885	0,326		
2	96	2,473	0,739			2	138	1,874	0,318		
2	97	2,46	0,730			2	139	1,865	0,312		
2	98	2,441	0,717			2	140	1,854	0,304	0,007	110,4
2	99	2,428	0,707			2	141	1,846	0,298		
2	100	2,409	0,694	0,012	70,8	2	142	1,839	0,293		

Продовження таблиці Б.1

Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
2	143	1,828	0,286			2	185	1,583	0,113	0,003	187
2	144	1,823	0,282			2	186	1,578	0,110		
2	145	1,815	0,276	0,005	123,4	2	187	1,574	0,107		
2	146	1,805	0,269			2	188	1,569	0,103		
2	147	1,804	0,269			2	189	1,565	0,101		
2	148	1,791	0,259			2	190	1,561	0,098	0,003	174,8
2	149	1,787	0,257			2	191	1,558	0,096		
2	150	1,775	0,248	0,006	146,1	2	192	1,553	0,092		
2	151	1,767	0,243			2	193	1,549	0,089		
2	152	1,761	0,238			2	194	1,548	0,089		
2	153	1,756	0,235			2	195	1,548	0,089	0,002	181,4
2	154	1,752	0,232			2	196	1,54	0,083		
2	155	1,742	0,225	0,005	148,6	2	197	1,539	0,082		
2	156	1,732	0,218			2	198	1,536	0,080		
2	157	1,731	0,217			2	199	1,53	0,076		
2	158	1,721	0,210			2	200	1,527	0,074	0,003	181,4
2	159	1,716	0,207			2	201	1,527	0,074		
2	160	1,709	0,202	0,005	158,3	2	202	1,519	0,068		
2	161	1,705	0,199			2	203	1,514	0,065		
2	162	1,698	0,194			2	204	1,514	0,065		
2	163	1,693	0,191			2	205	1,508	0,060	0,003	183
2	164	1,688	0,187			2	206	1,506	0,059		
2	165	1,681	0,182	0,004	169,6	2	207	1,503	0,057		
2	166	1,674	0,177			2	208	1,502	0,056		
2	167	1,672	0,176			2	209	1,501	0,056		
2	168	1,665	0,171			2	210	1,498	0,053	0,001	185,3
2	169	1,661	0,168			2	211	1,496	0,052		
2	170	1,657	0,165	0,003	169,8	2	212	1,489	0,047		
2	171	1,652	0,162			2	213	1,488	0,046		
2	172	1,644	0,156			2	214	1,483	0,043		
2	173	1,64	0,153			2	215	1,479	0,040	0,003	184,4
2	174	1,635	0,150			2	216	1,478	0,039		
2	175	1,627	0,144	0,004	168,8	2	217	1,472	0,035		
2	176	1,624	0,142			2	218	1,471	0,034		
2	177	1,619	0,139			2	219	1,469	0,033		
2	178	1,618	0,138			2	220	1,466	0,031	0,002	182,5
2	179	1,613	0,134			2	221	1,461	0,027		
2	180	1,603	0,127	0,003	178,2	2	222	1,461	0,027		
2	181	1,602	0,127			2	223	1,459	0,026		
2	182	1,6	0,125			2	224	1,457	0,025		
2	183	1,593	0,120			2	225	1,452	0,021	0,002	182,8
2	184	1,586	0,115			2	226	1,448	0,018		

Продовження таблиці Б.1

Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
2	227	1,448	0,018			3	26	1,477	1,245		
2	228	1,446	0,017			3	27	1,466	1,228		
2	229	1,446	0,017			3	28	1,454	1,210		
2	230	1,441	0,013	0,002	185,3	3	29	1,443	1,193		
2	231	1,439	0,012			3	30	1,427	1,173	0,020	85,9
2	232	1,439	0,012			3	31	1,416	1,152		
2	233	1,437	0,011			3	32	1,397	1,123		
2	234	1,435	0,009			3	33	1,384	1,103		
2	235	1,435	0,009	0,001	190,9	3	34	1,371	1,084		
2	236	1,435	0,009			3	35	1,355	1,059	0,023	86,4
2	237	1,431	0,006			3	36	1,344	1,043		
2	238	1,428	0,004			3	37	1,33	1,021		
2	239	1,428	0,004			3	38	1,318	1,003		
2	240	1,428	0,004	0,001	180,5	3	39	1,303	0,980		
2	241	1,428	0,004			3	40	1,292	0,964	0,019	86,6
2	242	1,422	0,000			3	41	1,275	0,938		
3	0	1,753	1,664	0,000	24	3	42	1,26	0,915		
3	1	1,75	1,660			3	43	1,251	0,901		
3	2	1,748	1,657			3	44	1,234	0,875		
3	3	1,741	1,646			3	45	1,222	0,857	0,021	88,8
3	4	1,739	1,643			3	46	1,208	0,836		
3	5	1,738	1,641	0,005	60,6	3	47	1,197	0,819		
3	6	1,725	1,622			3	48	1,186	0,802		
3	7	1,716	1,608			3	49	1,175	0,786		
3	8	1,71	1,599			3	50	1,157	0,758	0,020	90,2
3	9	1,698	1,581			3	51	1,147	0,743		
3	10	1,692	1,571	0,014	73	3	52	1,129	0,716		
3	11	1,675	1,546			3	53	1,123	0,707		
3	12	1,668	1,535			3	54	1,114	0,693		
3	13	1,654	1,514			3	55	1,095	0,664	0,019	92,7
3	14	1,642	1,495			3	56	1,088	0,653		
3	15	1,623	1,467	0,021	80,6	3	57	1,073	0,631		
3	16	1,615	1,454			3	58	1,06	0,611		
3	17	1,602	1,435			3	59	1,047	0,591		
3	18	1,589	1,415			3	60	1,039	0,569	0,019	94,3
3	19	1,576	1,395			3	61	1,026	0,559		
3	20	1,557	1,366	0,020	83,4	3	62	1,018	0,547		
3	21	1,55	1,356			3	63	1,001	0,521		
3	22	1,531	1,327			3	64	0,993	0,509		
3	23	1,52	1,310			3	65	0,98	0,489	0,016	96,4
3	24	1,508	1,292			3	66	0,966	0,468		
3	25	1,496	1,274	0,019	84,8	3	67	0,959	0,457		

Продовження таблиці Б.1

Номер дослід	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер дослід	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
3	68	0,943	0,433			3	110	0,729	0,108	0,001	209
3	69	0,935	0,421			3	111	0,726	0,103		
3	70	0,926	0,407	0,016	99,4	3	112	0,726	0,103		
3	71	0,918	0,395			3	113	0,726	0,103		
3	72	0,902	0,371			3	114	0,715	0,087		
3	73	0,894	0,359			3	115	0,717	0,090	0,004	211
3	74	0,884	0,343			3	116	0,72	0,094		
3	75	0,872	0,325	0,016	102,2	3	117	0,72	0,094		
3	76	0,862	0,310			3	118	0,717	0,090		
3	77	0,853	0,296			3	119	0,717	0,090		
3	78	0,846	0,286			3	120	0,717	0,090	0,000	212
3	79	0,837	0,272			3	121	0,713	0,084		
3	80	0,831	0,263	0,012	116	3	122	0,714	0,085		
3	81	0,821	0,248			3	123	0,714	0,085		
3	82	0,816	0,240			3	124	0,714	0,085		
3	83	0,807	0,226			3	125	0,711	0,081	0,002	214
3	84	0,806	0,225			3	126	0,708	0,076		
3	85	0,791	0,202	0,012	131,7	3	127	0,71	0,079		
3	86	0,786	0,195			3	128	0,71	0,079		
3	87	0,78	0,185			3	129	0,71	0,079		
3	88	0,779	0,184			3	130	0,708	0,076	0,001	214
3	89	0,774	0,176			3	131	0,708	0,076		
3	90	0,771	0,172	0,006	155,9	3	132	0,708	0,076		
3	91	0,767	0,166			3	133	0,708	0,076		
3	92	0,76	0,155			3	134	0,708	0,076		
3	93	0,756	0,149			3	135	0,708	0,076	0,000	216
3	94	0,752	0,143			3	136	0,708	0,076		
3	95	0,753	0,144	0,005	180,7	3	137	0,702	0,067		
3	96	0,742	0,128			3	138	0,7	0,064		
3	97	0,741	0,126			3	139	0,7	0,064		
3	98	0,743	0,129			3	140	0,7	0,064	0,002	216
3	99	0,743	0,129			3	141	0,7	0,064		
3	100	0,733	0,114	0,006	198	3	142	0,7	0,064		
3	101	0,735	0,117			3	143	0,7	0,064		
3	102	0,735	0,117			3	144	0,692	0,052		
3	103	0,732	0,112			3	145	0,697	0,059	0,001	217
3	104	0,731	0,111			3	146	0,694	0,055		
3	105	0,731	0,111	0,001	205	3	147	0,694	0,055		
3	106	0,731	0,111			3	148	0,694	0,055		
3	107	0,729	0,108			3	149	0,687	0,044		
3	108	0,728	0,106			3	150	0,694	0,055	0,001	217
3	109	0,729	0,108			3	151	0,69	0,049		

Продовження таблиці Б.1

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
3	152	0,69	0,049			3	180	0,673	0,023	0,000	217
3	153	0,686	0,043			3	181	0,673	0,023		
3	154	0,687	0,044			3	182	0,665	0,011		
3	155	0,682	0,036	0,004	217	3	183	0,665	0,011		
3	156	0,687	0,044			3	184	0,667	0,014		
3	157	0,687	0,044			3	185	0,667	0,014	0,002	214
3	158	0,687	0,044			3	186	0,666	0,012		
3	159	0,687	0,044			3	187	0,662	0,006		
3	160	0,682	0,036	0,000	216	3	188	0,66	0,003		
3	161	0,681	0,035			3	189	0,665	0,011		
3	162	0,681	0,035			3	190	0,663	0,008	0,001	217
3	163	0,681	0,035			3	191	0,663	0,008		
3	164	0,682	0,036			3	192	0,663	0,008		
3	165	0,682	0,036	0,000	215	3	193	0,663	0,008		
3	166	0,678	0,030			3	194	0,659	0,002		
3	167	0,677	0,029			3	195	0,661	0,005	0,001	215
3	168	0,674	0,024			3	196	0,661	0,005		
3	169	0,675	0,026			3	197	0,66	0,003		
3	170	0,675	0,026	0,002	218	3	198	0,661	0,005		
3	171	0,675	0,026			3	199	0,661	0,005		
3	172	0,675	0,026			3	200	0,661	0,005	0,000	215
3	173	0,673	0,023			3	201	0,661	0,005		
3	174	0,673	0,023			3	202	0,661	0,005		
3	175	0,673	0,023	0,001	216	3	203	0,662	0,006		
3	176	0,673	0,023			3	204	0,658	0,000		
3	177	0,673	0,023			3	205	0,658	0,000	0,001	216
3	178	0,673	0,023			3	206	0,658	0,000		
3	179	0,673	0,023								

Б.2 Дослідження впливу маси квадратного метру на кінетику сушіння флютингу

Дослідні зразки флютингу марки Б-1 з масою квадратного метру 112, 125, 140 г/м² за ДСТУ 7377-85 та нестандартному 200 г/м², густина теплового потоку рівна 6865 Вт/м².

Дослідження здійснювали за наступних умов:

- температура навколишнього середовища, °С 24
- відносна вологість повітря, % 70
- початкова температура зразків флютингу, °С 24

Таблиця Б.2 – Кінетичні закономірності процесу сушіння флютингу

Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
1	0	1,785	1,396	0,000	24	1	42	1,291	0,733		
1	1	1,782	1,392			1	43	1,284	0,723		
1	2	1,78	1,389			1	44	1,272	0,707		
1	3	1,778	1,387			1	45	1,253	0,682	0,018	94,7
1	4	1,769	1,374			1	46	1,242	0,667		
1	5	1,763	1,366	0,006	62,1	1	47	1,228	0,648		
1	6	1,758	1,360			1	48	1,215	0,631		
1	7	1,749	1,348			1	49	1,207	0,620		
1	8	1,744	1,341			1	50	1,185	0,591	0,018	96,6
1	9	1,727	1,318			1	51	1,18	0,584		
1	10	1,721	1,310	0,011	74,6	1	52	1,17	0,570		
1	11	1,711	1,297			1	53	1,159	0,556		
1	12	1,702	1,285			1	54	1,149	0,542		
1	13	1,688	1,266			1	55	1,13	0,517	0,015	98,6
1	14	1,675	1,248			1	56	1,124	0,509		
1	15	1,661	1,230	0,016	83,9	1	57	1,112	0,493		
1	16	1,646	1,209			1	58	1,102	0,479		
1	17	1,635	1,195			1	59	1,089	0,462		
1	18	1,62	1,174			1	60	1,069	0,435	0,016	100,9
1	19	1,61	1,161			1	61	1,063	0,427		
1	20	1,597	1,144	0,017	86	1	62	1,05	0,409		
1	21	1,587	1,130			1	63	1,04	0,396		
1	22	1,567	1,103			1	64	1,028	0,380		
1	23	1,555	1,087			1	65	1,023	0,373	0,012	103
1	24	1,538	1,064			1	66	1,006	0,350		
1	25	1,529	1,052	0,018	88,1	1	67	0,994	0,334		
1	26	1,514	1,032			1	68	0,978	0,313		
1	27	1,494	1,005			1	69	0,977	0,311		
1	28	1,484	0,992			1	70	0,969	0,301	0,014	108,4
1	29	1,467	0,969			1	71	0,959	0,287		
1	30	1,461	0,961	0,018	88,6	1	72	0,946	0,270		
1	31	1,44	0,933			1	73	0,939	0,260		
1	32	1,429	0,918			1	74	0,929	0,247		
1	33	1,415	0,899			1	75	0,919	0,234	0,013	118,1
1	34	1,403	0,883			1	76	0,911	0,223		
1	35	1,39	0,866	0,019	89,8	1	77	0,901	0,209		
1	36	1,381	0,854			1	78	0,894	0,200		
1	37	1,365	0,832			1	79	0,887	0,191		
1	38	1,354	0,817			1	80	0,884	0,187	0,009	136,1
1	39	1,337	0,795			1	81	0,873	0,172		
1	40	1,319	0,770	0,019	92,4	1	82	0,868	0,165		
1	41	1,31	0,758			1	83	0,863	0,158		

Продовження таблиці Б.2

Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
1	84	0,859	0,153			1	126	0,795	0,067		
1	85	0,857	0,150	0,007	156,5	1	127	0,79	0,060		
1	86	0,853	0,145			1	128	0,787	0,056		
1	87	0,847	0,137			1	129	0,797	0,070		
1	88	0,842	0,130			1	130	0,789	0,059	0,002	217
1	89	0,843	0,132			1	131	0,789	0,059		
1	90	0,839	0,126	0,005	174,3	1	132	0,783	0,051		
1	91	0,839	0,126			1	133	0,783	0,051		
1	92	0,832	0,117			1	134	0,778	0,044		
1	93	0,833	0,118			1	135	0,78	0,047	0,002	218
1	94	0,831	0,115			1	136	0,781	0,048		
1	95	0,828	0,111	0,003	191,3	1	137	0,78	0,047		
1	96	0,828	0,111			1	138	0,779	0,046		
1	97	0,824	0,106			1	139	0,779	0,046		
1	98	0,824	0,106			1	140	0,779	0,046	0,000	218
1	99	0,824	0,106			1	141	0,779	0,046		
1	100	0,824	0,106	0,001	200	1	142	0,781	0,048		
1	101	0,824	0,106			1	143	0,771	0,035		
1	102	0,822	0,103			1	144	0,773	0,038		
1	103	0,819	0,099			1	145	0,779	0,046	0,000	219
1	104	0,818	0,098			1	146	0,774	0,039		
1	105	0,813	0,091	0,003	205	1	147	0,772	0,036		
1	106	0,814	0,093			1	148	0,767	0,030		
1	107	0,811	0,089			1	149	0,767	0,030		
1	108	0,812	0,090			1	150	0,767	0,030	0,003	220
1	109	0,812	0,090			1	151	0,767	0,030		
1	110	0,812	0,090	0,000	210	1	152	0,766	0,028		
1	111	0,812	0,090			1	153	0,77	0,034		
1	112	0,809	0,086			1	154	0,765	0,027		
1	113	0,807	0,083			1	155	0,765	0,027	0,001	221
1	114	0,807	0,083			1	156	0,765	0,027		
1	115	0,807	0,083	0,001	212	1	157	0,76	0,020		
1	116	0,807	0,083			1	158	0,754	0,012		
1	117	0,802	0,077			1	159	0,753	0,011		
1	118	0,801	0,075			1	160	0,759	0,019	0,002	221
1	119	0,801	0,075			1	161	0,759	0,019		
1	120	0,801	0,075	0,002	214	1	162	0,76	0,020		
1	121	0,801	0,075			1	163	0,755	0,013		
1	122	0,801	0,075			1	164	0,753	0,011		
1	123	0,794	0,066			1	165	0,748	0,004	0,003	221
1	124	0,794	0,066			1	166	0,748	0,004		
1	125	0,797	0,070	0,001	216	1	167	0,751	0,008		

Продовження таблиці Б.2

Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
1	168	0,75	0,007			2	21	1,591	1,168		
1	169	0,75	0,007			2	22	1,576	1,147		
1	170	0,75	0,007	-0,001	222	2	23	1,565	1,132		
1	171	0,75	0,007			2	24	1,557	1,121		
1	172	0,75	0,007			2	25	1,54	1,098	0,017	85,9
1	173	0,75	0,007			2	26	1,526	1,079		
1	174	0,747	0,003			2	27	1,512	1,060		
1	175	0,747	0,003	0,001	223	2	28	1,501	1,045		
1	176	0,75	0,007			2	29	1,487	1,026		
1	177	0,75	0,007			2	30	1,472	1,005	0,019	87,3
1	178	0,746	0,001			2	31	1,463	0,993		
1	179	0,743	-0,003			2	32	1,447	0,971		
1	180	0,746	0,001	0,000	223	2	33	1,436	0,956		
1	181	0,747	0,003			2	34	1,422	0,937		
1	182	0,749	0,005			2	35	1,41	0,921	0,017	89,7
1	183	0,746	0,001			2	36	1,394	0,899		
1	184	0,747	0,003			2	37	1,384	0,886		
1	185	0,747	0,003	0,000	222	2	38	1,373	0,871		
1	186	0,747	0,003			2	39	1,354	0,845		
1	187	0,745	0,000			2	40	1,349	0,838	0,017	91,8
1	188	0,745	0,000			2	41	1,336	0,820		
2	0	1,771	1,413	0,000	24	2	42	1,321	0,800		
2	1	1,767	1,407			2	43	1,308	0,782		
2	2	1,767	1,407			2	44	1,3	0,771		
2	3	1,759	1,396			2	45	1,286	0,752	0,017	92,9
2	4	1,759	1,396			2	46	1,277	0,740		
2	5	1,759	1,396	0,003	65,4	2	47	1,261	0,718		
2	6	1,75	1,384			2	48	1,251	0,704		
2	7	1,743	1,375			2	49	1,238	0,687		
2	8	1,734	1,362			2	50	1,228	0,673	0,016	94,3
2	9	1,729	1,356			2	51	1,213	0,653		
2	10	1,715	1,337	0,012	76,6	2	52	1,199	0,634		
2	11	1,71	1,330			2	53	1,192	0,624		
2	12	1,696	1,311			2	54	1,181	0,609		
2	13	1,686	1,297			2	55	1,165	0,587	0,017	96,5
2	14	1,675	1,282			2	56	1,157	0,576		
2	15	1,66	1,262	0,015	81,8	2	57	1,148	0,564		
2	16	1,655	1,255			2	58	1,13	0,540		
2	17	1,643	1,238			2	59	1,125	0,533		
2	18	1,628	1,218			2	60	1,111	0,514	0,015	99,6
2	19	1,612	1,196			2	61	1,104	0,504		
2	20	1,604	1,185	0,015	84,6	2	62	1,091	0,486		

Продовження таблиці Б.2

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
2	63	1,078	0,469			2	105	0,818	0,114	0,002	204
2	64	1,068	0,455			2	106	0,817	0,113		
2	65	1,056	0,439	0,015	101,4	2	107	0,817	0,113		
2	66	1,046	0,425			2	108	0,817	0,113		
2	67	1,031	0,405			2	109	0,812	0,106		
2	68	1,024	0,395			2	110	0,808	0,101	0,003	208
2	69	1,009	0,375			2	111	0,813	0,108		
2	70	1,005	0,369	0,014	105,4	2	112	0,813	0,108		
2	71	0,992	0,351			2	113	0,813	0,108		
2	72	0,978	0,332			2	114	0,813	0,108		
2	73	0,971	0,323			2	115	0,808	0,101	0,000	210
2	74	0,961	0,309			2	116	0,808	0,101		
2	75	0,95	0,294	0,015	114,5	2	117	0,81	0,104		
2	76	0,943	0,285			2	118	0,808	0,101		
2	77	0,934	0,272			2	119	0,805	0,097		
2	78	0,924	0,259			2	120	0,803	0,094	0,001	211
2	79	0,918	0,251			2	121	0,803	0,094		
2	80	0,908	0,237	0,011	131,6	2	122	0,803	0,094		
2	81	0,901	0,228			2	123	0,805	0,097		
2	82	0,895	0,219			2	124	0,801	0,091		
2	83	0,891	0,214			2	125	0,8	0,090	0,001	213
2	84	0,881	0,200			2	126	0,803	0,094		
2	85	0,878	0,196	0,008	148,4	2	127	0,801	0,091		
2	86	0,867	0,181			2	128	0,795	0,083		
2	87	0,862	0,174			2	129	0,796	0,084		
2	88	0,859	0,170			2	130	0,795	0,083	0,001	214
2	89	0,852	0,161			2	131	0,792	0,079		
2	90	0,851	0,159	0,007	169,6	2	132	0,795	0,083		
2	91	0,848	0,155			2	133	0,792	0,079		
2	92	0,843	0,149			2	134	0,791	0,078		
2	93	0,84	0,144			2	135	0,792	0,079	0,001	215
2	94	0,837	0,140			2	136	0,79	0,076		
2	95	0,836	0,139	0,004	186,6	2	137	0,79	0,076		
2	96	0,831	0,132			2	138	0,79	0,076		
2	97	0,829	0,129			2	139	0,79	0,076		
2	98	0,829	0,129			2	140	0,787	0,072	0,001	217
2	99	0,829	0,129			2	141	0,786	0,071		
2	100	0,826	0,125	0,003	197,3	2	142	0,786	0,071		
2	101	0,825	0,124			2	143	0,786	0,071		
2	102	0,825	0,124			2	144	0,784	0,068		
2	103	0,825	0,124			2	145	0,783	0,067	0,001	217
2	104	0,819	0,116			2	146	0,78	0,063		

Продовження таблиці Б.2

Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
2	147	0,78	0,063			2	189	0,746	0,016		
2	148	0,78	0,063			2	190	0,746	0,016	0,002	219
2	149	0,78	0,063			2	191	0,743	0,012		
2	150	0,775	0,056	0,002	218	2	192	0,745	0,015		
2	151	0,775	0,056			2	193	0,739	0,007		
2	152	0,775	0,056			2	194	0,745	0,015		
2	153	0,775	0,056			2	195	0,746	0,016	0,000	219
2	154	0,775	0,056			2	196	0,741	0,010		
2	155	0,775	0,056	0,000	218	2	197	0,739	0,007		
2	156	0,775	0,056			2	198	0,745	0,015		
2	157	0,769	0,048			2	199	0,743	0,012		
2	158	0,769	0,048			2	200	0,743	0,012	0,001	219
2	159	0,769	0,048			2	201	0,743	0,012		
2	160	0,769	0,048	0,002	218	2	202	0,743	0,012		
2	161	0,769	0,048			2	203	0,738	0,005		
2	162	0,766	0,044			2	204	0,737	0,004		
2	163	0,765	0,042			2	205	0,737	0,004	0,002	219
2	164	0,765	0,042			2	206	0,737	0,004		
2	165	0,765	0,042	0,001	218	2	207	0,737	0,004		
2	166	0,761	0,037			2	208	0,737	0,004		
2	167	0,761	0,037			2	209	0,734	0,000		
2	168	0,761	0,037			3	0	1,581	1,421	0,000	24
2	169	0,761	0,037			3	1	1,575	1,412		
2	170	0,758	0,033	0,002	218	3	2	1,573	1,408		
2	171	0,757	0,031			3	3	1,571	1,406		
2	172	0,758	0,033			3	4	1,569	1,402		
2	173	0,758	0,033			3	5	1,564	1,394	0,005	56
2	174	0,758	0,033			3	6	1,561	1,391		
2	175	0,758	0,033	0,000	219	3	7	1,559	1,387		
2	176	0,755	0,029			3	8	1,551	1,375		
2	177	0,756	0,030			3	9	1,545	1,365		
2	178	0,756	0,030			3	10	1,537	1,354	0,008	73,3
2	179	0,756	0,030			3	11	1,531	1,345		
2	180	0,75	0,022	0,002	219	3	12	1,520	1,327		
2	181	0,75	0,022			3	13	1,514	1,319		
2	182	0,752	0,025			3	14	1,505	1,305		
2	183	0,752	0,025			3	15	1,496	1,291	0,013	83,3
2	184	0,748	0,019			3	16	1,489	1,281		
2	185	0,752	0,025	-0,001	219	3	17	1,479	1,264		
2	186	0,752	0,025			3	18	1,469	1,250		
2	187	0,747	0,018			3	19	1,457	1,231		
2	188	0,747	0,018			3	20	1,450	1,220	0,014	86,4

Продовження таблиці Б.2

Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
3	21	1,438	1,202			3	63	0,995	0,523		
3	22	1,428	1,187			3	64	0,987	0,512		
3	23	1,414	1,166			3	65	0,977	0,496	0,014	100,9
3	24	1,405	1,152			3	66	0,969	0,484		
3	25	1,395	1,137	0,017	87,7	3	67	0,951	0,456		
3	26	1,382	1,116			3	68	0,936	0,434		
3	27	1,373	1,102			3	69	0,936	0,434		
3	28	1,357	1,078			3	70	0,928	0,421	0,015	102,9
3	29	1,351	1,068			3	71	0,920	0,410		
3	30	1,341	1,054	0,016	88,2	3	72	0,912	0,397		
3	31	1,329	1,035			3	73	0,906	0,387		
3	32	1,316	1,015			3	74	0,895	0,370		
3	33	1,309	1,005			3	75	0,887	0,358	0,013	106,3
3	34	1,294	0,981			3	76	0,877	0,343		
3	35	1,287	0,971	0,017	88,2	3	77	0,873	0,336		
3	36	1,272	0,948			3	78	0,862	0,320		
3	37	1,259	0,928			3	79	0,849	0,301		
3	38	1,250	0,914			3	80	0,842	0,290	0,014	109,9
3	39	1,238	0,896			3	81	0,835	0,279		
3	40	1,229	0,882	0,018	89,7	3	82	0,829	0,269		
3	41	1,215	0,861			3	83	0,822	0,259		
3	42	1,206	0,847			3	84	0,812	0,244		
3	43	1,195	0,831			3	85	0,808	0,238	0,010	113,6
3	44	1,185	0,814			3	86	0,811	0,241		
3	45	1,172	0,795	0,017	91,9	3	87	0,807	0,235		
3	46	1,162	0,780			3	88	0,797	0,220		
3	47	1,153	0,766			3	89	0,794	0,216		
3	48	1,141	0,747			3	90	0,784	0,201	0,007	121,9
3	49	1,135	0,738			3	91	0,780	0,194		
3	50	1,120	0,716	0,016	95	3	92	0,777	0,189		
3	51	1,114	0,705			3	93	0,770	0,179		
3	52	1,105	0,692			3	94	0,769	0,177		
3	53	1,091	0,670			3	95	0,766	0,173	0,006	131,1
3	54	1,078	0,651			3	96	0,764	0,170		
3	55	1,072	0,642	0,015	96,5	3	97	0,761	0,165		
3	56	1,062	0,627			3	98	0,758	0,160		
3	57	1,057	0,618			3	99	0,757	0,159		
3	58	1,044	0,599			3	100	0,752	0,151	0,004	147
3	59	1,029	0,575			3	101	0,750	0,148		
3	60	1,023	0,566	0,015	98,3	3	102	0,750	0,148		
3	61	1,009	0,545			3	103	0,750	0,148		
3	62	1,001	0,534			3	104	0,747	0,143		

Продовження таблиці Б.2

Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
3	105	0,746	0,142	0,002	163,4	3	147	0,706	0,081		
3	106	0,746	0,142			3	148	0,704	0,078		
3	107	0,746	0,142			3	149	0,703	0,076		
3	108	0,739	0,132			3	150	0,700	0,072	0,002	
3	109	0,738	0,131			3	151	0,700	0,072		
3	110	0,737	0,129	0,002	180,6	3	152	0,700	0,072		
3	111	0,737	0,129			3	153	0,700	0,072		
3	112	0,737	0,129			3	154	0,695	0,064		
3	113	0,732	0,121			3	155	0,695	0,064	0,002	
3	114	0,728	0,115			3	156	0,695	0,064		
3	115	0,728	0,115	0,003	193,3	3	157	0,695	0,064		
3	116	0,728	0,115			3	158	0,695	0,064		
3	117	0,728	0,115			3	159	0,695	0,064		
3	118	0,728	0,115			3	160	0,695	0,064	0,000	
3	119	0,728	0,115			3	161	0,689	0,054		
3	120	0,728	0,115	0,000	203	3	162	0,689	0,054		
3	121	0,728	0,115			3	163	0,689	0,054		
3	122	0,728	0,115			3	164	0,689	0,054		
3	123	0,725	0,111			3	165	0,689	0,054	0,002	
3	124	0,723	0,107			3	166	0,686	0,050		
3	125	0,723	0,107	0,002	210	3	167	0,685	0,048		
3	126	0,723	0,107			3	168	0,685	0,048		
3	127	0,723	0,107			3	169	0,685	0,048		
3	128	0,721	0,104			3	170	0,680	0,042	0,002	
3	129	0,720	0,103			3	171	0,680	0,042		
3	130	0,720	0,103	0,001	213	3	172	0,680	0,042		
3	131	0,721	0,104			3	173	0,680	0,042		
3	132	0,715	0,095			3	174	0,677	0,037		
3	133	0,715	0,095			3	175	0,676	0,036	0,001	
3	134	0,715	0,095			3	176	0,676	0,036		
3	135	0,712	0,090	0,002	215	3	177	0,676	0,036		
3	136	0,712	0,090			3	178	0,676	0,036		
3	137	0,712	0,090			3	179	0,676	0,036		
3	138	0,711	0,089			3	180	0,674	0,033	0,001	
3	139	0,711	0,089			3	181	0,674	0,033		
3	140	0,710	0,087	0,001	218	3	182	0,674	0,033		
3	141	0,710	0,087			3	183	0,674	0,033		
3	142	0,710	0,087			3	184	0,669	0,025		
3	143	0,710	0,087			3	185	0,669	0,025	0,002	
3	144	0,707	0,083			3	186	0,669	0,025		
3	145	0,706	0,081	0,001	219	3	187	0,669	0,025		
3	146	0,706	0,081			3	188	0,667	0,022		

Продовження таблиці Б.2

Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
3	189	0,667	0,022			4	17	2,561	1,320		
3	190	0,667	0,022	0,001		4	18	2,548	1,308		
3	191	0,666	0,020			4	19	2,535	1,296		
3	192	0,666	0,020			4	20	2,527	1,289	0,011	76,3
3	193	0,665	0,019			4	21	2,514	1,277		
3	194	0,665	0,019			4	22	2,496	1,261		
3	195	0,662	0,014	0,002		4	23	2,482	1,248		
3	196	0,662	0,014			4	24	2,47	1,237		
3	197	0,658	0,008			4	25	2,462	1,230	0,012	80,9
3	198	0,658	0,008			4	26	2,449	1,218		
3	199	0,658	0,008			4	27	2,431	1,202		
3	200	0,660	0,011	0,001		4	28	2,423	1,195		
3	201	0,658	0,008			4	29	2,408	1,181		
3	202	0,658	0,008			4	30	2,401	1,175	0,011	85,3
3	203	0,662	0,014			4	31	2,384	1,159		
3	204	0,662	0,014			4	32	2,376	1,152		
3	205	0,662	0,014	-0,001		4	33	2,362	1,139		
3	206	0,662	0,014			4	34	2,348	1,127		
3	207	0,657	0,006			4	35	2,33	1,111	0,013	87,3
3	208	0,656	0,005			4	36	2,321	1,102		
3	209	0,656	0,005			4	37	2,302	1,085		
3	210	0,656	0,005	0,002		4	38	2,289	1,073		
3	211	0,656	0,005			4	39	2,28	1,065		
3	212	0,656	0,005			4	40	2,264	1,051	0,012	88,9
3	213	0,653	0,000			4	41	2,253	1,041		
4	0	2,685	1,432	0,000	22	4	42	2,239	1,028		
4	1	2,683	1,430			4	43	2,228	1,018		
4	2	2,681	1,428			4	44	2,21	1,002		
4	3	2,671	1,419			4	45	2,201	0,994	0,011	90,2
4	4	2,668	1,417			4	46	2,187	0,981		
4	5	2,665	1,414	0,004	46	4	47	2,168	0,964		
4	6	2,662	1,411			4	48	2,16	0,957		
4	7	2,651	1,401			4	49	2,149	0,947		
4	8	2,649	1,399			4	50	2,139	0,938	0,011	91,1
4	9	2,64	1,391			4	51	2,121	0,921		
4	10	2,633	1,385	0,006	61,4	4	52	2,112	0,913		
4	11	2,625	1,378			4	53	2,097	0,899		
4	12	2,615	1,369			4	54	2,088	0,891		
4	13	2,605	1,360			4	55	2,071	0,876	0,012	91,9
4	14	2,593	1,349			4	56	2,063	0,869		
4	15	2,587	1,343	0,008	70,7	4	57	2,047	0,854		
4	16	2,572	1,330			4	58	2,031	0,840		

Продовження таблиці Б.2

Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
4	59	2,022	0,832			4	101	1,549	0,403		
4	60	2,006	0,817	0,012	93,6	4	102	1,539	0,394		
4	61	1,997	0,809			4	103	1,53	0,386		
4	62	1,984	0,797			4	104	1,523	0,380		
4	63	1,975	0,789			4	105	1,511	0,369	0,009	116,2
4	64	1,962	0,777			4	106	1,501	0,360		
4	65	1,949	0,765	0,010	94,9	4	107	1,488	0,348		
4	66	1,94	0,757			4	108	1,476	0,337		
4	67	1,929	0,747			4	109	1,471	0,332		
4	68	1,914	0,734			4	110	1,46	0,322	0,009	126,6
4	69	1,905	0,726			4	111	1,452	0,315		
4	70	1,888	0,710	0,011	96,9	4	112	1,437	0,302		
4	71	1,872	0,696			4	113	1,432	0,297		
4	72	1,867	0,691			4	114	1,422	0,288		
4	73	1,852	0,678			4	115	1,416	0,283	0,008	145,1
4	74	1,845	0,671			4	116	1,413	0,280		
4	75	1,83	0,658	0,011	98,6	4	117	1,396	0,264		
4	76	1,824	0,652			4	118	1,391	0,260		
4	77	1,812	0,641			4	119	1,381	0,251		
4	78	1,802	0,632			4	120	1,376	0,246	0,007	167,7
4	79	1,788	0,620			4	121	1,367	0,238		
4	80	1,772	0,605	0,011	100,6	4	122	1,362	0,234		
4	81	1,766	0,600			4	123	1,353	0,226		
4	82	1,753	0,588			4	124	1,352	0,225		
4	83	1,745	0,581			4	125	1,343	0,216	0,006	181,6
4	84	1,73	0,567			4	126	1,339	0,213		
4	85	1,721	0,559	0,009	102,4	4	127	1,332	0,207		
4	86	1,706	0,545			4	128	1,324	0,199		
4	87	1,7	0,540			4	129	1,322	0,197		
4	88	1,686	0,527			4	130	1,312	0,188	0,006	196,8
4	89	1,676	0,518			4	131	1,309	0,186		
4	90	1,66	0,504	0,011	103,6	4	132	1,307	0,184		
4	91	1,652	0,496			4	133	1,306	0,183		
4	92	1,641	0,486			4	134	1,296	0,174		
4	93	1,63	0,476			4	135	1,292	0,170	0,004	203,5
4	94	1,62	0,467			4	136	1,289	0,168		
4	95	1,604	0,453	0,010	106,2	4	137	1,283	0,162		
4	96	1,596	0,446			4	138	1,28	0,159		
4	97	1,587	0,438			4	139	1,272	0,152		
4	98	1,582	0,433			4	140	1,269	0,149	0,004	209
4	99	1,568	0,420			4	141	1,269	0,149		
4	100	1,559	0,412	0,008	108,9	4	142	1,264	0,145		

Продовження таблиці Б.2

Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліду	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
4	143	1,259	0,140			4	185	1,182	0,071	0,001	226
4	144	1,257	0,139			4	186	1,181	0,070		
4	145	1,257	0,139	0,002	214	4	187	1,18	0,069		
4	146	1,252	0,134			4	188	1,18	0,069		
4	147	1,25	0,132			4	189	1,18	0,069		
4	148	1,25	0,132			4	190	1,18	0,069	0,000	227
4	149	1,245	0,128			4	191	1,18	0,069		
4	150	1,242	0,125	0,003	215	4	192	1,174	0,063		
4	151	1,242	0,125			4	193	1,173	0,063		
4	152	1,238	0,121			4	194	1,173	0,063		
4	153	1,236	0,120			4	195	1,173	0,063	0,001	228
4	154	1,229	0,113			4	196	1,168	0,058		
4	155	1,229	0,113	0,002	219	4	197	1,169	0,059		
4	156	1,226	0,111			4	198	1,17	0,060		
4	157	1,226	0,111			4	199	1,164	0,054		
4	158	1,219	0,104			4	200	1,167	0,057	0,001	228
4	159	1,219	0,104			4	201	1,162	0,053		
4	160	1,218	0,103	0,002	222	4	202	1,167	0,057		
4	161	1,218	0,103			4	203	1,166	0,056		
4	162	1,218	0,103			4	204	1,164	0,054		
4	163	1,215	0,101			4	205	1,161	0,052	0,001	229
4	164	1,211	0,097			4	206	1,157	0,048		
4	165	1,21	0,096	0,001	224	4	207	1,153	0,044		
4	166	1,21	0,096			4	208	1,153	0,044		
4	167	1,21	0,096			4	209	1,153	0,044		
4	168	1,21	0,096			4	210	1,153	0,044	0,001	229
4	169	1,206	0,092			4	211	1,153	0,044		
4	170	1,206	0,092	0,001	224	4	212	1,153	0,044		
4	171	1,201	0,088			4	213	1,145	0,037		
4	172	1,2	0,087			4	214	1,145	0,037		
4	173	1,199	0,086			4	215	1,15	0,042	0,001	230
4	174	1,199	0,086			4	216	1,15	0,042		
4	175	1,197	0,084	0,002	225	4	217	1,145	0,037		
4	176	1,191	0,079			4	218	1,146	0,038		
4	177	1,185	0,073			4	219	1,142	0,034		
4	178	1,188	0,076			4	220	1,143	0,035	0,001	230
4	179	1,183	0,072			4	221	1,143	0,035		
4	180	1,186	0,074	0,002	226	4	222	1,142	0,034		
4	181	1,186	0,074			4	223	1,14	0,033		
4	182	1,181	0,070			4	224	1,138	0,031		
4	183	1,185	0,073			4	225	1,137	0,030	0,001	230
4	184	1,185	0,073			4	226	1,14	0,033		

Продовження таблиці Б.2

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
4	227	1,138	0,031			4	253	1,117	0,012		
4	228	1,137	0,030			4	254	1,117	0,012		
4	229	1,137	0,030			4	255	1,117	0,012	0,000	231
4	230	1,135	0,028	0,000	231	4	256	1,114	0,009		
4	231	1,134	0,027			4	257	1,115	0,010		
4	232	1,129	0,023			4	258	1,112	0,007		
4	233	1,136	0,029			4	259	1,115	0,010		
4	234	1,134	0,027			4	260	1,111	0,006	0,001	232
4	235	1,13	0,024	0,001	231	4	261	1,11	0,005		
4	236	1,128	0,022			4	262	1,11	0,005		
4	237	1,127	0,021			4	263	1,11	0,005		
4	238	1,123	0,017			4	264	1,11	0,005		
4	239	1,121	0,015			4	265	1,11	0,005	0,000	232
4	240	1,121	0,015	0,002	231	4	266	1,106	0,002		
4	241	1,124	0,018			4	267	1,108	0,004		
4	242	1,121	0,015			4	268	1,111	0,006		
4	243	1,12	0,014			4	269	1,108	0,004		
4	244	1,121	0,015			4	270	1,111	0,006	0,000	232
4	245	1,121	0,015	0,000	231	4	271	1,111	0,006		
4	246	1,121	0,015			4	272	1,11	0,005		
4	247	1,117	0,012			4	273	1,109	0,005		
4	248	1,12	0,014			4	274	1,105	0,001		
4	249	1,118	0,013			4	275	1,106	0,002	0,001	232
4	250	1,119	0,014	0,000	231	4	276	1,106	0,002		
4	251	1,119	0,014			4	277	1,104	0,000		
4	252	1,115	0,010								

Б.3 Дослідження впливу початкового вологовмісту на кінетику сушіння флютингу

Дослідні зразки флютингу марки Б-1 з масою квадратного метру 125 г/м^2 за ДСТУ 7377-85 при густині теплового потоку рівній 6865 Вт/м^2 .

Дослідження здійснювали за наступних умов:

- температура навколишнього середовища, °С 24
- відносна вологість повітря, % 70
- початкова температура зразків флютингу, °С 24

Таблиця Б.3 – Кінетичні закономірності сушіння

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
1	0	3,794	1,689	0,000	14	1	42	3,437	1,436		
1	1	3,789	1,685			1	43	3,422	1,425		
1	2	3,788	1,685			1	44	3,416	1,421		
1	3	3,784	1,682			1	45	3,402	1,411	0,008	61,2
1	4	3,782	1,680			1	46	3,4	1,410		
1	5	3,779	1,678	0,002	32,3	1	47	3,383	1,398		
1	6	3,774	1,675			1	48	3,364	1,384		
1	7	3,767	1,670			1	49	3,354	1,377		
1	8	3,762	1,666			1	50	3,34	1,367	0,009	62
1	9	3,759	1,664			1	51	3,328	1,359		
1	10	3,759	1,664	0,003	45,2	1	52	3,319	1,352		
1	11	3,747	1,656			1	53	3,3	1,339		
1	12	3,741	1,651			1	54	3,291	1,332		
1	13	3,733	1,646			1	55	3,28	1,325	0,009	62,8
1	14	3,725	1,640			1	56	3,264	1,313		
1	15	3,721	1,637	0,005	51,8	1	57	3,256	1,308		
1	16	3,71	1,629			1	58	3,248	1,302		
1	17	3,707	1,627			1	59	3,234	1,292		
1	18	3,697	1,620			1	60	3,221	1,283	0,008	63,4
1	19	3,684	1,611			1	61	3,204	1,271		
1	20	3,676	1,605	0,006	58,3	1	62	3,195	1,264		
1	21	3,669	1,600			1	63	3,178	1,252		
1	22	3,663	1,596			1	64	3,167	1,245		
1	23	3,649	1,586			1	65	3,15	1,232	0,010	62,4
1	24	3,634	1,575			1	66	3,141	1,226		
1	25	3,625	1,569	0,007	59,1	1	67	3,128	1,217		
1	26	3,619	1,565			1	68	3,112	1,206		
1	27	3,611	1,559			1	69	3,102	1,198		
1	28	3,597	1,549			1	70	3,092	1,190	0,008	64
1	29	3,58	1,537			1	71	3,076	1,180		
1	30	3,574	1,533	0,007	59,5	1	72	3,066	1,173		
1	31	3,561	1,524			1	73	3,054	1,164		
1	32	3,553	1,518			1	74	3,044	1,157		
1	33	3,54	1,509			1	75	3,027	1,145	0,009	64,7
1	34	3,532	1,503			1	76	3,012	1,135		
1	35	3,522	1,496	0,007	60,1	1	77	3,005	1,130		
1	36	3,503	1,483			1	78	2,985	1,116		
1	37	3,494	1,476			1	79	2,976	1,109		
1	38	3,481	1,467			1	80	2,961	1,099	0,009	64,9
1	39	3,476	1,464			1	81	2,949	1,090		
1	40	3,458	1,451	0,009	59,9	1	82	2,934	1,079		
1	41	3,447	1,443			1	83	2,921	1,070		

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
1	84	2,914	1,065			1	126	2,389	0,693		
1	85	2,898	1,054	0,009	65,2	1	127	2,371	0,680		
1	86	2,881	1,042			1	128	2,358	0,671		
1	87	2,872	1,035			1	129	2,344	0,661		
1	88	2,861	1,028			1	130	2,333	0,653	0,009	69,4
1	89	2,85	1,020			1	131	2,324	0,647		
1	90	2,833	1,008	0,009	66,4	1	132	2,307	0,635		
1	91	2,817	0,996			1	133	2,295	0,627		
1	92	2,807	0,989			1	134	2,282	0,617		
1	93	2,799	0,984			1	135	2,267	0,607	0,009	72,4
1	94	2,787	0,975			1	136	2,257	0,600		
1	95	2,768	0,962	0,009	66,7	1	137	2,245	0,591		
1	96	2,756	0,953			1	138	2,231	0,581		
1	97	2,746	0,946			1	139	2,226	0,578		
1	98	2,733	0,937			1	140	2,207	0,564	0,009	70,2
1	99	2,72	0,928			1	141	2,197	0,557		
1	100	2,708	0,919	0,009	68,5	1	142	2,181	0,546		
1	101	2,69	0,906			1	143	2,168	0,536		
1	102	2,681	0,900			1	144	2,159	0,530		
1	103	2,666	0,889			1	145	2,147	0,522	0,009	72,7
1	104	2,66	0,885			1	146	2,139	0,516		
1	105	2,646	0,875	0,009	67,8	1	147	2,125	0,506		
1	106	2,63	0,864			1	148	2,108	0,494		
1	107	2,621	0,858			1	149	2,1	0,488		
1	108	2,611	0,850			1	150	2,08	0,479	0,008	72,8
1	109	2,598	0,841			1	151	2,071	0,468		
1	110	2,585	0,832	0,009	67,8	1	152	2,065	0,464		
1	111	2,571	0,822			1	153	2,051	0,454		
1	112	2,556	0,811			1	154	2,045	0,449		
1	113	2,542	0,802			1	155	2,028	0,437	0,008	72,9
1	114	2,532	0,794			1	156	2,02	0,432		
1	115	2,521	0,787	0,009	66,6	1	157	2,007	0,422		
1	116	2,503	0,774			1	158	1,998	0,416		
1	117	2,495	0,768			1	159	1,987	0,408		
1	118	2,48	0,758			1	160	1,978	0,402	0,007	84,8
1	119	2,469	0,750			1	161	1,97	0,396		
1	120	2,457	0,741	0,009	69,1	1	162	1,959	0,388		
1	121	2,444	0,732			1	163	1,943	0,377		
1	122	2,434	0,725			1	164	1,933	0,370		
1	123	2,416	0,712			1	165	1,924	0,364	0,008	95,8
1	124	2,413	0,710			1	166	1,919	0,360		
1	125	2,397	0,699	0,009	69,9	1	167	1,905	0,350		

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
1	168	1,894	0,342			1	210	1,608	0,140	0,004	153,3
1	169	1,886	0,337			1	211	1,605	0,137		
1	170	1,873	0,327	0,007	99,4	1	212	1,606	0,138		
1	171	1,867	0,323			1	213	1,606	0,138		
1	172	1,858	0,317			1	214	1,595	0,130		
1	173	1,849	0,310			1	215	1,594	0,130	0,002	155,6
1	174	1,841	0,305			1	216	1,592	0,128		
1	175	1,828	0,296	0,006	111,2	1	217	1,586	0,124		
1	176	1,82	0,290			1	218	1,583	0,122		
1	177	1,813	0,285			1	219	1,578	0,118		
1	178	1,802	0,277			1	220	1,576	0,117	0,003	158,8
1	179	1,796	0,273			1	221	1,568	0,111		
1	180	1,785	0,265	0,006	126,4	1	222	1,567	0,111		
1	181	1,783	0,264			1	223	1,565	0,109		
1	182	1,771	0,255			1	224	1,559	0,105		
1	183	1,764	0,250			1	225	1,553	0,101	0,003	152,3
1	184	1,756	0,245			1	226	1,553	0,101		
1	185	1,751	0,241	0,005	125,2	1	227	1,55	0,099		
1	186	1,75	0,240			1	228	1,546	0,096		
1	187	1,74	0,233			1	229	1,545	0,095		
1	188	1,732	0,227			1	230	1,541	0,092	0,002	152,7
1	189	1,726	0,223			1	231	1,535	0,088		
1	190	1,719	0,218	0,005	132,8	1	232	1,534	0,087		
1	191	1,711	0,213			1	233	1,53	0,084		
1	192	1,707	0,210			1	234	1,528	0,083		
1	193	1,697	0,203			1	235	1,528	0,083	0,002	156,6
1	194	1,694	0,201			1	236	1,523	0,079		
1	195	1,691	0,198	0,004	142	1	237	1,515	0,074		
1	196	1,686	0,195			1	238	1,512	0,072		
1	197	1,68	0,191			1	239	1,51	0,070		
1	198	1,678	0,189			1	240	1,51	0,070	0,003	160,9
1	199	1,671	0,184			1	241	1,5	0,063		
1	200	1,662	0,178	0,004	145,8	1	242	1,498	0,062		
1	201	1,658	0,175			1	243	1,497	0,061		
1	202	1,65	0,169			1	244	1,497	0,061		
1	203	1,646	0,167			1	245	1,497	0,061	0,002	158,1
1	204	1,643	0,164			1	246	1,492	0,057		
1	205	1,637	0,160	0,004	152,8	1	247	1,491	0,057		
1	206	1,633	0,157			1	248	1,491	0,057		
1	207	1,631	0,156			1	249	1,485	0,052		
1	208	1,63	0,155			1	250	1,484	0,052	0,002	154,4
1	209	1,62	0,148			1	251	1,48	0,049		

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
1	252	1,48	0,049			1	294	1,422	0,008		
1	253	1,48	0,049			1	295	1,422	0,008	0,000	160,9
1	254	1,48	0,049			1	296	1,418	0,005		
1	255	1,476	0,046	0,001	155,8	1	297	1,42	0,006		
1	256	1,473	0,044			1	298	1,42	0,006		
1	257	1,471	0,043			1	299	1,415	0,003		
1	258	1,462	0,036			1	300	1,413	0,001	0,001	160,7
1	259	1,461	0,035			1	301	1,411	0,000		
1	260	1,459	0,034	0,002	160,2	1	302	1,411	0,000		
1	261	1,459	0,034			2	0	3,655	1,526	0,000	16,1
1	262	1,459	0,034			2	1	3,652	1,524		
1	263	1,457	0,033			2	2	3,645	1,519		
1	264	1,454	0,030			2	3	3,643	1,518		
1	265	1,454	0,030	0,001	159,3	2	4	3,64	1,516		
1	266	1,454	0,030			2	5	3,632	1,510	0,003	35,3
1	267	1,451	0,028			2	6	3,628	1,507		
1	268	1,451	0,028			2	7	3,621	1,502		
1	269	1,451	0,028			2	8	3,613	1,497		
1	270	1,448	0,026	0,001	159,4	2	9	3,608	1,493		
1	271	1,446	0,025			2	10	3,605	1,491	0,004	45,1
1	272	1,445	0,024			2	11	3,596	1,485		
1	273	1,445	0,024			2	12	3,583	1,476		
1	274	1,442	0,022			2	13	3,572	1,469		
1	275	1,443	0,023	0,001	161,1	2	14	3,567	1,465		
1	276	1,443	0,023			2	15	3,563	1,462	0,006	51,6
1	277	1,443	0,023			2	16	3,547	1,451		
1	278	1,443	0,023			2	17	3,534	1,442		
1	279	1,443	0,023			2	18	3,525	1,436		
1	280	1,439	0,020	0,001	159,2	2	19	3,518	1,431		
1	281	1,439	0,020			2	20	3,509	1,425	0,007	57,4
1	282	1,435	0,017			2	21	3,5	1,419		
1	283	1,435	0,017			2	22	3,49	1,412		
1	284	1,436	0,018			2	23	3,476	1,402		
1	285	1,433	0,016	0,001	161,4	2	24	3,464	1,394		
1	286	1,432	0,015			2	25	3,457	1,389	0,007	59,7
1	287	1,423	0,009			2	26	3,437	1,375		
1	288	1,428	0,012			2	27	3,425	1,367		
1	289	1,427	0,011			2	28	3,415	1,360		
1	290	1,422	0,008	0,002	159,8	2	29	3,403	1,352		
1	291	1,422	0,008			2	30	3,393	1,345	0,009	60,1
1	292	1,422	0,008			2	31	3,376	1,333		
1	293	1,422	0,008			2	32	3,367	1,327		

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
2	33	3,357	1,320			2	75	2,814	0,945	0,009	65
2	34	3,34	1,308			2	76	2,8	0,935		
2	35	3,329	1,301	0,009	58,8	2	77	2,789	0,927		
2	36	3,315	1,291			2	78	2,772	0,916		
2	37	3,311	1,288			2	79	2,763	0,909		
2	38	3,293	1,276			2	80	2,749	0,900	0,009	65,3
2	39	3,284	1,270			2	81	2,733	0,889		
2	40	3,267	1,258	0,009	60,4	2	82	2,724	0,883		
2	41	3,255	1,249			2	83	2,711	0,874		
2	42	3,248	1,245			2	84	2,701	0,867		
2	43	3,226	1,229			2	85	2,684	0,855	0,009	64,6
2	44	3,218	1,224			2	86	2,672	0,847		
2	45	3,204	1,214	0,009	60,9	2	87	2,66	0,838		
2	46	3,192	1,206			2	88	2,645	0,828		
2	47	3,182	1,199			2	89	2,638	0,823		
2	48	3,163	1,186			2	90	2,619	0,810	0,009	65,6
2	49	3,154	1,180			2	91	2,602	0,798		
2	50	3,142	1,171	0,009	62,4	2	92	2,595	0,793		
2	51	3,126	1,160			2	93	2,582	0,784		
2	52	3,115	1,153			2	94	2,574	0,779		
2	53	3,102	1,144			2	95	2,554	0,765	0,009	65,6
2	54	3,091	1,136			2	96	2,537	0,753		
2	55	3,078	1,127	0,009	63	2	97	2,531	0,749		
2	56	3,063	1,117			2	98	2,518	0,740		
2	57	3,057	1,113			2	99	2,506	0,732		
2	58	3,034	1,097			2	100	2,493	0,723	0,008	66,6
2	59	3,024	1,090			2	101	2,479	0,713		
2	60	3,008	1,079	0,010	62,5	2	102	2,464	0,703		
2	61	2,995	1,070			2	103	2,454	0,696		
2	62	2,984	1,062			2	104	2,441	0,687		
2	63	2,967	1,050			2	105	2,430	0,679	0,009	66,6
2	64	2,96	1,046			2	106	2,415	0,669		
2	65	2,945	1,035	0,009	63,4	2	107	2,404	0,661		
2	66	2,926	1,022			2	108	2,389	0,651		
2	67	2,918	1,017			2	109	2,380	0,645		
2	68	2,899	1,003			2	110	2,362	0,632	0,009	67,6
2	69	2,888	0,996			2	111	2,352	0,625		
2	70	2,877	0,988	0,009	63,9	2	112	2,341	0,618		
2	71	2,862	0,978			2	113	2,324	0,606		
2	72	2,851	0,970			2	114	2,311	0,597		
2	73	2,838	0,961			2	115	2,297	0,587	0,009	69,6
2	74	2,827	0,954			2	116	2,283	0,578		

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
2	117	2,272	0,570			2	159	1,824	0,261		
2	118	2,256	0,559			2	160	1,819	0,257	0,004	103
2	119	2,248	0,554			2	161	1,811	0,252		
2	120	2,236	0,545	0,008	73,1	2	162	1,801	0,245		
2	121	2,217	0,532			2	163	1,797	0,242		
2	122	2,209	0,527			2	164	1,789	0,236		
2	123	2,196	0,518			2	165	1,780	0,230	0,005	118,8
2	124	2,185	0,510			2	166	1,776	0,227		
2	125	2,171	0,500	0,009	75,6	2	167	1,771	0,224		
2	126	2,153	0,488			2	168	1,758	0,215		
2	127	2,145	0,482			2	169	1,754	0,212		
2	128	2,133	0,474			2	170	1,750	0,209	0,004	128,9
2	129	2,124	0,468			2	171	1,747	0,207		
2	130	2,107	0,456	0,009	79,8	2	172	1,740	0,202		
2	131	2,094	0,447			2	173	1,732	0,197		
2	132	2,086	0,442			2	174	1,728	0,194		
2	133	2,076	0,435			2	175	1,724	0,191	0,004	131,4
2	134	2,066	0,428			2	176	1,717	0,187		
2	135	2,051	0,417	0,008	81,6	2	177	1,715	0,185		
2	136	2,047	0,415			2	178	1,709	0,181		
2	137	2,032	0,404			2	179	1,699	0,174		
2	138	2,021	0,397			2	180	1,693	0,170	0,004	139
2	139	2,012	0,390			2	181	1,692	0,169		
2	140	1,999	0,381	0,007	82,6	2	182	1,688	0,167		
2	141	1,985	0,372			2	183	1,677	0,159		
2	142	1,979	0,368			2	184	1,673	0,156		
2	143	1,964	0,357			2	185	1,672	0,155	0,003	149,6
2	144	1,957	0,352			2	186	1,662	0,149		
2	145	1,941	0,341	0,008	84,7	2	187	1,658	0,146		
2	146	1,939	0,340			2	188	1,656	0,144		
2	147	1,925	0,330			2	189	1,652	0,142		
2	148	1,916	0,324			2	190	1,646	0,138	0,004	152,2
2	149	1,908	0,319			2	191	1,639	0,133		
2	150	1,897	0,311	0,006	90,6	2	192	1,638	0,132		
2	151	1,889	0,305			2	193	1,630	0,126		
2	152	1,881	0,300			2	194	1,629	0,126		
2	153	1,870	0,292			2	195	1,624	0,122	0,003	154,5
2	154	1,866	0,290			2	196	1,616	0,117		
2	155	1,851	0,279	0,006	98,1	2	197	1,616	0,117		
2	156	1,846	0,276			2	198	1,610	0,113		
2	157	1,839	0,271			2	199	1,606	0,110		
2	158	1,829	0,264			2	200	1,602	0,107	0,003	157,9

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
2	201	1,597	0,104			2	243	1,481	0,023		
2	202	1,594	0,102			2	244	1,481	0,023		
2	203	1,589	0,098			2	245	1,479	0,022	0,000	160,6
2	204	1,589	0,098			2	246	1,477	0,021		
2	205	1,587	0,097	0,002	156,6	2	247	1,477	0,021		
2	206	1,584	0,095			2	248	1,471	0,017		
2	207	1,577	0,090			2	249	1,470	0,016		
2	208	1,574	0,088			2	250	1,470	0,016	0,001	159,3
2	209	1,570	0,085			2	251	1,470	0,016		
2	210	1,566	0,082	0,003	154,6	2	252	1,467	0,014		
2	211	1,563	0,080			2	253	1,465	0,012		
2	212	1,563	0,080			2	254	1,465	0,012		
2	213	1,555	0,075			2	255	1,458	0,008	0,002	162,4
2	214	1,550	0,071			2	256	1,457	0,007		
2	215	1,545	0,068	0,003	158,9	2	257	1,454	0,005		
2	216	1,546	0,068			2	258	1,453	0,004		
2	217	1,546	0,068			2	259	1,453	0,004		
2	218	1,542	0,066			2	260	1,450	0,002	0,001	157,3
2	219	1,539	0,064			2	261	1,451	0,003		
2	220	1,538	0,063	0,001	164,3	2	262	1,451	0,003		
2	221	1,537	0,062			2	263	1,448	0,001		
2	222	1,533	0,059			2	264	1,447	0,000		
2	223	1,531	0,058			2	265	1,447	0,000	0,000	162,2
2	224	1,527	0,055			3	0	3,865	1,718	0,000	16,7
2	225	1,523	0,053	0,002	166,7	3	1	3,863	1,717		
2	226	1,519	0,050			3	2	3,858	1,713		
2	227	1,516	0,048			3	3	3,855	1,711		
2	228	1,516	0,048			3	4	3,851	1,708		
2	229	1,516	0,048			3	5	3,849	1,707	0,002	38,3
2	230	1,511	0,044	0,002	164,9	3	6	3,840	1,700		
2	231	1,507	0,041			3	7	3,833	1,695		
2	232	1,505	0,040			3	8	3,831	1,694		
2	233	1,503	0,039			3	9	3,820	1,686		
2	234	1,499	0,036			3	10	3,814	1,682	0,005	52,9
2	235	1,499	0,036	0,002	161,9	3	11	3,804	1,675		
2	236	1,499	0,036			3	12	3,797	1,670		
2	237	1,493	0,032			3	13	3,784	1,661		
2	238	1,492	0,031			3	14	3,774	1,654		
2	239	1,491	0,030			3	15	3,765	1,648	0,007	59,1
2	240	1,482	0,024	0,002	164,5	3	16	3,751	1,638		
2	241	1,483	0,025			3	17	3,743	1,632		
2	242	1,481	0,023			3	18	3,727	1,621		

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
3	19	3,713	1,611			3	61	3,054	1,148		
3	20	3,702	1,603	0,009	63,4	3	62	3,039	1,137		
3	21	3,687	1,593			3	63	3,018	1,122		
3	22	3,674	1,584			3	64	3	1,110		
3	23	3,657	1,572			3	65	2,991	1,103	0,011	67,8
3	24	3,642	1,561			3	66	2,97	1,089		
3	25	3,631	1,553	0,010	65,3	3	67	2,959	1,081		
3	26	3,614	1,541			3	68	2,935	1,064		
3	27	3,603	1,534			3	69	2,919	1,053		
3	28	3,585	1,521			3	70	2,907	1,048	0,011	69,2
3	29	3,570	1,511			3	71	2,887	1,030		
3	30	3,559	1,503	0,010	66,7	3	72	2,874	1,021		
3	31	3,541	1,490			3	73	2,856	1,008		
3	32	3,527	1,480			3	74	2,834	0,993		
3	33	3,509	1,468			3	75	2,824	0,986	0,012	69,7
3	34	3,492	1,456			3	76	2,8	0,969		
3	35	3,477	1,445	0,012	66,9	3	77	2,788	0,961		
3	36	3,461	1,434			3	78	2,77	0,948		
3	37	3,448	1,425			3	79	2,754	0,937		
3	38	3,430	1,412			3	80	2,74	0,927	0,012	69,6
3	39	3,411	1,399			3	81	2,718	0,911		
3	40	3,398	1,390	0,011	67,1	3	82	2,705	0,902		
3	41	3,382	1,378			3	83	2,687	0,890		
3	42	3,370	1,370			3	84	2,672	0,879		
3	43	3,352	1,357			3	85	2,656	0,868	0,012	70,8
3	44	3,331	1,342			3	86	2,64	0,857		
3	45	3,317	1,333	0,011	67,3	3	87	2,628	0,848		
3	46	3,301	1,321			3	88	2,609	0,835		
3	47	3,289	1,313			3	89	2,591	0,822		
3	48	3,269	1,299			3	90	2,576	0,812	0,011	69,5
3	49	3,248	1,284			3	91	2,558	0,799		
3	50	3,239	1,278	0,011	68,1	3	92	2,548	0,792		
3	51	3,221	1,265			3	93	2,526	0,776		
3	52	3,208	1,256			3	94	2,515	0,769		
3	53	3,187	1,241			3	95	2,494	0,754	0,012	69,9
3	54	3,168	1,228			3	96	2,473	0,739		
3	55	3,152	1,217	0,012	68,6	3	97	2,46	0,730		
3	56	3,133	1,203			3	98	2,441	0,717		
3	57	3,12	1,194			3	99	2,428	0,707		
3	58	3,106	1,184			3	100	2,409	0,694	0,012	70,8
3	59	3,083	1,168			3	101	2,39	0,681		
3	60	3,069	1,158	0,012	69	3	102	2,375	0,670		

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
3	103	2,356	0,657			3	145	1,815	0,276	0,005	123,4
3	104	2,343	0,648			3	146	1,805	0,269		
3	105	2,323	0,634	0,012	73,6	3	147	1,804	0,269		
3	106	2,306	0,622			3	148	1,791	0,259		
3	107	2,292	0,612			3	149	1,787	0,257		
3	108	2,271	0,597			3	150	1,775	0,248	0,006	146,1
3	109	2,261	0,590			3	151	1,767	0,243		
3	110	2,241	0,576	0,012	76,8	3	152	1,761	0,238		
3	111	2,223	0,563			3	153	1,756	0,235		
3	112	2,211	0,555			3	154	1,752	0,232		
3	113	2,197	0,545			3	155	1,742	0,225	0,005	148,6
3	114	2,182	0,534			3	156	1,732	0,218		
3	115	2,163	0,521	0,011	78,3	3	157	1,731	0,217		
3	116	2,147	0,510			3	158	1,721	0,210		
3	117	2,135	0,501			3	159	1,716	0,207		
3	118	2,117	0,489			3	160	1,709	0,202	0,005	158,3
3	119	2,106	0,481			3	161	1,705	0,199		
3	120	2,091	0,470	0,010	79,2	3	162	1,698	0,194		
3	121	2,074	0,459			3	163	1,693	0,191		
3	122	2,061	0,449			3	164	1,688	0,187		
3	123	2,046	0,439			3	165	1,681	0,182	0,004	169,6
3	124	2,033	0,430			3	166	1,674	0,177		
3	125	2,02	0,421	0,010	86,3	3	167	1,672	0,176		
3	126	2,004	0,409			3	168	1,665	0,171		
3	127	1,993	0,402			3	169	1,661	0,168		
3	128	1,978	0,391			3	170	1,657	0,165	0,003	169,8
3	129	1,969	0,385			3	171	1,652	0,162		
3	130	1,956	0,376	0,009	91,7	3	172	1,644	0,156		
3	131	1,946	0,368			3	173	1,64	0,153		
3	132	1,94	0,364			3	174	1,635	0,150		
3	133	1,925	0,354			3	175	1,627	0,144	0,004	168,8
3	134	1,921	0,351			3	176	1,624	0,142		
3	135	1,905	0,340	0,007	102,5	3	177	1,619	0,139		
3	136	1,893	0,331			3	178	1,618	0,138		
3	137	1,885	0,326			3	179	1,613	0,134		
3	138	1,874	0,318			3	180	1,603	0,127	0,003	178,2
3	139	1,865	0,312			3	181	1,602	0,127		
3	140	1,854	0,304	0,007	110,4	3	182	1,6	0,125		
3	141	1,846	0,298			3	183	1,593	0,120		
3	142	1,839	0,293			3	184	1,586	0,115		
3	143	1,828	0,286			3	185	1,583	0,113	0,003	187
3	144	1,823	0,282			3	186	1,578	0,110		

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
3	187	1,574	0,107			3	229	1,446	0,017		
3	188	1,569	0,103			3	230	1,441	0,013	0,002	185,3
3	189	1,565	0,101			3	231	1,439	0,012		
3	190	1,561	0,098	0,003	174,8	3	232	1,439	0,012		
3	191	1,558	0,096			3	233	1,437	0,011		
3	192	1,553	0,092			3	234	1,435	0,009		
3	193	1,549	0,089			3	235	1,435	0,009	0,001	190,9
3	194	1,548	0,089			3	236	1,435	0,009		
3	195	1,548	0,089	0,002	181,4	3	237	1,431	0,006		
3	196	1,54	0,083			3	238	1,428	0,004		
3	197	1,539	0,082			3	239	1,428	0,004		
3	198	1,536	0,080			3	240	1,428	0,004	0,001	180,5
3	199	1,53	0,076			3	241	1,428	0,004		
3	200	1,527	0,074	0,003	181,4	3	242	1,422	0,000		
3	201	1,527	0,074			4	0	3,863	1,567	0,000	17
3	202	1,519	0,068			4	1	3,861	1,565		
3	203	1,514	0,065			4	2	3,858	1,563		
3	204	1,514	0,065			4	3	3,848	1,557		
3	205	1,508	0,060	0,003	183	4	4	3,844	1,554		
3	206	1,506	0,059			4	5	3,837	1,550	0,003	46,2
3	207	1,503	0,057			4	6	3,832	1,546		
3	208	1,502	0,056			4	7	3,822	1,540		
3	209	1,501	0,056			4	8	3,811	1,532		
3	210	1,498	0,053	0,001	185,3	4	9	3,801	1,526		
3	211	1,496	0,052			4	10	3,789	1,518	0,006	58,8
3	212	1,489	0,047			4	11	3,78	1,512		
3	213	1,488	0,046			4	12	3,767	1,503		
3	214	1,483	0,043			4	13	3,753	1,494		
3	215	1,479	0,040	0,003	184,4	4	14	3,741	1,486		
3	216	1,478	0,039			4	15	3,721	1,472	0,009	62,5
3	217	1,472	0,035			4	16	3,71	1,465		
3	218	1,471	0,034			4	17	3,697	1,456		
3	219	1,469	0,033			4	18	3,677	1,443		
3	220	1,466	0,031	0,002	182,5	4	19	3,665	1,435		
3	221	1,461	0,027			4	20	3,645	1,422	0,010	68,6
3	222	1,461	0,027			4	21	3,632	1,413		
3	223	1,459	0,026			4	22	3,614	1,401		
3	224	1,457	0,025			4	23	3,593	1,387		
3	225	1,452	0,021	0,002	182,8	4	24	3,58	1,379		
3	226	1,448	0,018			4	25	3,559	1,365	0,011	63,2
3	227	1,448	0,018			4	26	3,544	1,355		
3	228	1,446	0,017			4	27	3,525	1,342		

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
4	28	3,505	1,329			4	70	2,716	0,810	0,012	75
4	29	3,489	1,318			4	71	2,702	0,795		
4	30	3,467	1,304	0,012	65	4	72	2,682	0,782		
4	31	3,445	1,289			4	73	2,664	0,770		
4	32	3,433	1,281			4	74	2,648	0,759		
4	33	3,411	1,266			4	75	2,629	0,747	0,013	73,4
4	34	3,397	1,257			4	76	2,615	0,738		
4	35	3,377	1,244	0,012	67,9	4	77	2,595	0,724		
4	36	3,356	1,230			4	78	2,574	0,710		
4	37	3,343	1,221			4	79	2,561	0,702		
4	38	3,319	1,205			4	80	2,539	0,687	0,012	73
4	39	3,303	1,195			4	81	2,526	0,678		
4	40	3,282	1,181	0,013	68,5	4	82	2,501	0,662		
4	41	3,267	1,171			4	83	2,486	0,652		
4	42	3,243	1,155			4	84	2,467	0,639		
4	43	3,222	1,141			4	85	2,447	0,626	0,012	73,9
4	44	3,209	1,132			4	86	2,431	0,615		
4	45	3,188	1,118	0,012	73,9	4	87	2,41	0,601		
4	46	3,172	1,108			4	88	2,4	0,595		
4	47	3,15	1,093			4	89	2,378	0,580		
4	48	3,127	1,078			4	90	2,354	0,564	0,012	76
4	49	3,114	1,069			4	91	2,341	0,555		
4	50	3,092	1,058	0,012	71,4	4	92	2,321	0,542		
4	51	3,078	1,045			4	93	2,307	0,533		
4	52	3,054	1,029			4	94	2,289	0,521		
4	53	3,034	1,016			4	95	2,267	0,506	0,012	78,9
4	54	3,019	1,006			4	96	2,256	0,499		
4	55	2,997	0,991	0,013	71,3	4	97	2,234	0,484		
4	56	2,984	0,983			4	98	2,222	0,476		
4	57	2,959	0,966			4	99	2,201	0,462		
4	58	2,94	0,953			4	100	2,183	0,450	0,011	81,4
4	59	2,923	0,942			4	101	2,171	0,443		
4	60	2,901	0,928	0,013	71,8	4	102	2,152	0,430		
4	61	2,885	0,917			4	103	2,138	0,421		
4	62	2,867	0,905			4	104	2,119	0,408		
4	63	2,845	0,890			4	105	2,104	0,398	0,010	84,1
4	64	2,832	0,882			4	106	2,093	0,391		
4	65	2,814	0,870	0,012	73,9	4	107	2,075	0,379		
4	66	2,799	0,860			4	108	2,064	0,371		
4	67	2,772	0,842			4	109	2,048	0,361		
4	68	2,752	0,829			4	110	2,032	0,350	0,010	88,8
4	69	2,741	0,821			4	111	2,021	0,343		

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
4	112	2,006	0,333			4	154	1,676	0,114		
4	113	1,995	0,326			4	155	1,666	0,107	0,004	165,3
4	114	1,982	0,317			4	156	1,665	0,106		
4	115	1,967	0,307	0,009	93,8	4	157	1,656	0,100		
4	116	1,958	0,301			4	158	1,655	0,100		
4	117	1,945	0,292			4	159	1,649	0,096		
4	118	1,936	0,286			4	160	1,643	0,092	0,003	157,3
4	119	1,926	0,280			4	161	1,638	0,088		
4	120	1,915	0,272	0,007	105,1	4	162	1,631	0,084		
4	121	1,906	0,266			4	163	1,626	0,080		
4	122	1,897	0,260			4	164	1,621	0,077		
4	123	1,884	0,252			4	165	1,619	0,076	0,003	160,5
4	124	1,878	0,248			4	166	1,614	0,072		
4	125	1,867	0,241	0,006	112,9	4	167	1,61	0,070		
4	126	1,862	0,237			4	168	1,606	0,067		
4	127	1,855	0,233			4	169	1,603	0,065		
4	128	1,846	0,227			4	170	1,601	0,064	0,002	172,4
4	129	1,84	0,223			4	171	1,596	0,060		
4	130	1,83	0,216	0,005	131,3	4	172	1,59	0,056		
4	131	1,823	0,211			4	173	1,591	0,057		
4	132	1,814	0,205			4	174	1,584	0,052		
4	133	1,808	0,201			4	175	1,579	0,049	0,003	173,6
4	134	1,8	0,196			4	176	1,577	0,048		
4	135	1,788	0,188	0,006	142,1	4	177	1,572	0,045		
4	136	1,782	0,184			4	178	1,567	0,041		
4	137	1,775	0,179			4	179	1,564	0,039		
4	138	1,769	0,175			4	180	1,564	0,039	0,002	173,8
4	139	1,763	0,171			4	181	1,564	0,039		
4	140	1,756	0,167	0,004	141,3	4	182	1,559	0,036		
4	141	1,749	0,162			4	183	1,552	0,031		
4	142	1,743	0,158			4	184	1,551	0,031		
4	143	1,736	0,153			4	185	1,545	0,027	0,003	174,4
4	144	1,73	0,150			4	186	1,544	0,026		
4	145	1,722	0,144	0,005	154,1	4	187	1,542	0,025		
4	146	1,72	0,143			4	188	1,537	0,021		
4	147	1,71	0,136			4	189	1,536	0,021		
4	148	1,707	0,134			4	190	1,533	0,019	0,002	182,5
4	149	1,701	0,130			4	191	1,531	0,017		
4	150	1,693	0,125	0,004	157,2	4	192	1,528	0,015		
4	151	1,69	0,123			4	193	1,526	0,014		
4	152	1,684	0,119			4	194	1,523	0,012		
4	153	1,682	0,118			4	195	1,521	0,011	0,002	183,1

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
4	196	1,516	0,007			5	36	1,252	0,794		
4	197	1,512	0,005			5	37	1,243	0,781		
4	198	1,51	0,003			5	38	1,228	0,759		
4	199	1,506	0,001			5	39	1,218	0,745		
4	200	1,505	0,000	0,002	175,2	5	40	1,203	0,728	0,017	93,1
4	201	1,505	0,000			5	41	1,195	0,712		
5	0	1,651	1,365	0,000	24	5	42	1,178	0,688		
5	1	1,645	1,357			5	43	1,167	0,672		
5	2	1,641	1,351			5	44	1,156	0,656		
5	3	1,639	1,348			5	45	1,143	0,638	0,018	97,2
5	4	1,632	1,338			5	46	1,134	0,625		
5	5	1,623	1,325	0,008	60	5	47	1,119	0,603		
5	6	1,62	1,321			5	48	1,106	0,585		
5	7	1,612	1,309			5	49	1,094	0,567		
5	8	1,607	1,302			5	50	1,082	0,559	0,016	99,6
5	9	1,59	1,278			5	51	1,068	0,530		
5	10	1,582	1,266	0,012	73,4	5	52	1,056	0,513		
5	11	1,568	1,246			5	53	1,048	0,501		
5	12	1,56	1,235			5	54	1,031	0,477		
5	13	1,548	1,218			5	55	1,019	0,460	0,020	102,1
5	14	1,537	1,202			5	56	1,014	0,453		
5	15	1,528	1,189	0,015	81,8	5	57	1,004	0,438		
5	16	1,512	1,166			5	58	0,994	0,424		
5	17	1,503	1,153			5	59	0,977	0,400		
5	18	1,487	1,130			5	60	0,965	0,383	0,015	105,3
5	19	1,475	1,113			5	61	0,951	0,362		
5	20	1,461	1,109	0,016	85,4	5	62	0,947	0,357		
5	21	1,449	1,076			5	63	0,939	0,345		
5	22	1,438	1,060			5	64	0,93	0,332		
5	23	1,425	1,042			5	65	0,924	0,324	0,012	109,6
5	24	1,408	1,017			5	66	0,909	0,302		
5	25	1,395	0,999	0,022	87,3	5	67	0,9	0,289		
5	26	1,376	0,971			5	68	0,884	0,266		
5	27	1,358	0,946			5	69	0,883	0,265		
5	28	1,349	0,933			5	70	0,873	0,259	0,013	119,1
5	29	1,34	0,920			5	71	0,862	0,235		
5	30	1,332	0,911	0,017	89,1	5	72	0,852	0,221		
5	31	1,317	0,887			5	73	0,847	0,213		
5	32	1,303	0,867			5	74	0,842	0,206		
5	33	1,287	0,844			5	75	0,833	0,193	0,013	134,8
5	34	1,274	0,825			5	76	0,833	0,193		
5	35	1,265	0,812	0,020	91,2	5	77	0,82	0,175		

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
5	78	0,814	0,166			5	120	0,751	0,076	0,000	215
5	79	0,802	0,149			5	121	0,751	0,076		
5	80	0,805	0,153	0,008	151,4	5	122	0,751	0,076		
5	81	0,8	0,146			5	123	0,751	0,076		
5	82	0,8	0,146			5	124	0,751	0,076		
5	83	0,799	0,145			5	125	0,751	0,076	0,000	217
5	84	0,795	0,139			5	126	0,751	0,076		
5	85	0,793	0,136	0,003	171	5	127	0,751	0,076		
5	86	0,783	0,122			5	128	0,751	0,076		
5	87	0,784	0,123			5	129	0,751	0,076		
5	88	0,787	0,128			5	130	0,751	0,076	0,000	218
5	89	0,787	0,128			5	131	0,751	0,076		
5	90	0,784	0,123	0,003	186	5	132	0,747	0,070		
5	91	0,784	0,123			5	133	0,746	0,069		
5	92	0,778	0,115			5	134	0,746	0,069		
5	93	0,778	0,115			5	135	0,746	0,069	0,001	218
5	94	0,779	0,116			5	136	0,741	0,062		
5	95	0,775	0,110	0,003	199,4	5	137	0,742	0,063		
5	96	0,775	0,110			5	138	0,739	0,059		
5	97	0,772	0,106			5	139	0,739	0,059		
5	98	0,77	0,103			5	140	0,739	0,059	0,002	218
5	99	0,771	0,105			5	141	0,737	0,056		
5	100	0,771	0,105	0,001	206	5	142	0,736	0,054		
5	101	0,765	0,096			5	143	0,73	0,046		
5	102	0,764	0,095			5	144	0,733	0,050		
5	103	0,763	0,093			5	145	0,734	0,052	0,001	219
5	104	0,763	0,093			5	146	0,726	0,040		
5	105	0,763	0,093	0,002	210	5	147	0,732	0,049		
5	106	0,763	0,093			5	148	0,733	0,050		
5	107	0,76	0,089			5	149	0,727	0,042		
5	108	0,753	0,079			5	150	0,731	0,047	0,001	219
5	109	0,751	0,076			5	151	0,728	0,043		
5	110	0,756	0,083	0,002	214	5	152	0,729	0,044		
5	111	0,756	0,083			5	153	0,728	0,043		
5	112	0,752	0,077			5	154	0,724	0,037		
5	113	0,743	0,064			5	155	0,726	0,040	0,001	220
5	114	0,75	0,074			5	156	0,725	0,039		
5	115	0,752	0,077	0,001	215	5	157	0,725	0,039		
5	116	0,751	0,076			5	158	0,725	0,039		
5	117	0,751	0,076			5	159	0,722	0,034		
5	118	0,751	0,076			5	160	0,722	0,034	0,001	220
5	119	0,751	0,076			5	161	0,722	0,034		

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
5	162	0,722	0,034			6	4	1,759	1,396		
5	163	0,719	0,030			6	5	1,759	1,396	0,003	65,4
5	164	0,719	0,030			6	6	1,75	1,384		
5	165	0,716	0,026	0,002	220	6	7	1,743	1,375		
5	166	0,719	0,030			6	8	1,734	1,362		
5	167	0,718	0,029			6	9	1,729	1,356		
5	168	0,721	0,033			6	10	1,715	1,337	0,012	76,6
5	169	0,714	0,023			6	11	1,71	1,330		
5	170	0,716	0,026	0,000	221	6	12	1,696	1,311		
5	171	0,713	0,021			6	13	1,686	1,297		
5	172	0,713	0,021			6	14	1,675	1,282		
5	173	0,699	0,001			6	15	1,66	1,262	0,015	81,8
5	174	0,71	0,017			6	16	1,655	1,255		
5	175	0,707	0,013	0,003	220	6	17	1,643	1,238		
5	176	0,707	0,013			6	18	1,628	1,218		
5	177	0,71	0,017			6	19	1,612	1,196		
5	178	0,706	0,011			6	20	1,604	1,181	0,016	84,6
5	179	0,705	0,010			6	21	1,591	1,168		
5	180	0,704	0,009	0,001	221	6	22	1,576	1,147		
5	181	0,701	0,004			6	23	1,565	1,132		
5	182	0,706	0,011			6	24	1,557	1,121		
5	183	0,706	0,011			6	25	1,54	1,098	0,017	85,9
5	184	0,707	0,013			6	26	1,526	1,079		
5	185	0,705	0,010	0,000	221	6	27	1,512	1,060		
5	186	0,704	0,009			6	28	1,501	1,045		
5	187	0,701	0,004			6	29	1,487	1,026		
5	188	0,7	0,003			6	30	1,472	1,015	0,017	87,3
5	189	0,7	0,003			6	31	1,463	0,993		
5	190	0,7	0,003	0,001	221	6	32	1,447	0,971		
5	191	0,7	0,003			6	33	1,436	0,956		
5	192	0,7	0,003			6	34	1,422	0,937		
5	193	0,7	0,003			6	35	1,41	0,921	0,019	89,7
5	194	0,701	0,004			6	36	1,394	0,899		
5	195	0,702	0,006	-0,001	221	6	37	1,384	0,886		
5	196	0,702	0,006			6	38	1,373	0,871		
5	197	0,702	0,006			6	39	1,354	0,845		
5	198	0,698	0,000			6	40	1,349	0,838	0,017	91,8
5	199	0,698	0,000			6	41	1,336	0,820		
6	0	1,771	1,413	0,000	24	6	42	1,321	0,800		
6	1	1,767	1,407			6	43	1,308	0,782		
6	2	1,767	1,407			6	44	1,3	0,771		
6	3	1,759	1,396			6	45	1,286	0,752	0,017	92,9

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
6	46	1,277	0,740			6	88	0,859	0,170		
6	47	1,261	0,718			6	89	0,852	0,161		
6	48	1,251	0,704			6	90	0,851	0,159	0,007	169,6
6	49	1,238	0,687			6	91	0,848	0,155		
6	50	1,228	0,673	0,016	94,3	6	92	0,843	0,149		
6	51	1,213	0,653			6	93	0,84	0,144		
6	52	1,199	0,634			6	94	0,837	0,140		
6	53	1,192	0,624			6	95	0,836	0,139	0,004	186,6
6	54	1,181	0,609			6	96	0,831	0,132		
6	55	1,165	0,587	0,017	96,5	6	97	0,829	0,129		
6	56	1,157	0,576			6	98	0,829	0,129		
6	57	1,148	0,564			6	99	0,829	0,129		
6	58	1,13	0,540			6	100	0,826	0,125	0,003	197,3
6	59	1,125	0,533			6	101	0,825	0,124		
6	60	1,111	0,510	0,015	99,6	6	102	0,825	0,124		
6	61	1,104	0,504			6	103	0,825	0,124		
6	62	1,091	0,486			6	104	0,819	0,116		
6	63	1,078	0,469			6	105	0,818	0,114	0,002	204
6	64	1,068	0,455			6	106	0,817	0,113		
6	65	1,056	0,439	0,014	101,4	6	107	0,817	0,113		
6	66	1,046	0,425			6	108	0,817	0,113		
6	67	1,031	0,405			6	109	0,812	0,106		
6	68	1,024	0,395			6	110	0,808	0,101	0,003	208
6	69	1,009	0,375			6	111	0,813	0,108		
6	70	1,005	0,369	0,014	105,4	6	112	0,813	0,108		
6	71	0,992	0,351			6	113	0,813	0,108		
6	72	0,978	0,332			6	114	0,813	0,108		
6	73	0,971	0,323			6	115	0,808	0,101	0,000	210
6	74	0,961	0,309			6	116	0,808	0,101		
6	75	0,95	0,294	0,015	114,5	6	117	0,81	0,104		
6	76	0,943	0,285			6	118	0,808	0,101		
6	77	0,934	0,272			6	119	0,805	0,097		
6	78	0,924	0,259			6	120	0,803	0,094	0,001	211
6	79	0,918	0,251			6	121	0,803	0,094		
6	80	0,908	0,237	0,011	131,6	6	122	0,803	0,094		
6	81	0,901	0,228			6	123	0,805	0,097		
6	82	0,895	0,219			6	124	0,801	0,091		
6	83	0,891	0,214			6	125	0,8	0,090	0,001	213
6	84	0,881	0,200			6	126	0,803	0,094		
6	85	0,878	0,196	0,008	148,4	6	127	0,801	0,091		
6	86	0,867	0,181			6	128	0,795	0,083		
6	87	0,862	0,174			6	129	0,796	0,084		

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
6	130	0,795	0,083	0,001	214	6	172	0,758	0,033		
6	131	0,792	0,079			6	173	0,758	0,033		
6	132	0,795	0,083			6	174	0,758	0,033		
6	133	0,792	0,079			6	175	0,758	0,033	0,000	219
6	134	0,791	0,078			6	176	0,755	0,029		
6	135	0,792	0,079	0,001	215	6	177	0,756	0,030		
6	136	0,79	0,076			6	178	0,756	0,030		
6	137	0,79	0,076			6	179	0,756	0,030		
6	138	0,79	0,076			6	180	0,75	0,022	0,002	219
6	139	0,79	0,076			6	181	0,75	0,022		
6	140	0,787	0,072	0,001	217	6	182	0,752	0,025		
6	141	0,786	0,071			6	183	0,752	0,025		
6	142	0,786	0,071			6	184	0,748	0,019		
6	143	0,786	0,071			6	185	0,752	0,025	-0,001	219
6	144	0,784	0,068			6	186	0,752	0,025		
6	145	0,783	0,067	0,001	217	6	187	0,747	0,018		
6	146	0,78	0,063			6	188	0,747	0,018		
6	147	0,78	0,063			6	189	0,746	0,016		
6	148	0,78	0,063			6	190	0,746	0,016	0,002	219
6	149	0,78	0,063			6	191	0,743	0,012		
6	150	0,775	0,056	0,002	218	6	192	0,745	0,015		
6	151	0,775	0,056			6	193	0,739	0,007		
6	152	0,775	0,056			6	194	0,745	0,015		
6	153	0,775	0,056			6	195	0,746	0,016	0,000	219
6	154	0,775	0,056			6	196	0,741	0,010		
6	155	0,775	0,056	0,000	218	6	197	0,739	0,007		
6	156	0,775	0,056			6	198	0,745	0,015		
6	157	0,769	0,048			6	199	0,743	0,012		
6	158	0,769	0,048			6	200	0,743	0,012	0,001	219
6	159	0,769	0,048			6	201	0,743	0,012		
6	160	0,769	0,048	0,002	218	6	202	0,743	0,012		
6	161	0,769	0,048			6	203	0,738	0,005		
6	162	0,766	0,044			6	204	0,737	0,004		
6	163	0,765	0,042			6	205	0,737	0,004	0,002	219
6	164	0,765	0,042			6	206	0,737	0,004		
6	165	0,765	0,042	0,001	218	6	207	0,737	0,004		
6	166	0,761	0,037			6	208	0,737	0,004		
6	167	0,761	0,037			6	209	0,734	0,000		
6	168	0,761	0,037			6	172	0,758	0,033		
6	169	0,761	0,037			6	173	0,758	0,033		
6	170	0,758	0,033	0,002	218	6	174	0,758	0,033		
6	171	0,757	0,031			6	175	0,758	0,033	0,000	219

Продовження таблиці Б.3

Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С	Номер досліджу	Час сушіння, с	Маса зразка, г	Вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння, кг/(кг·с)	Температура зразка, °С
6	176	0,755	0,029			6	193	0,739	0,007		
6	177	0,756	0,030			6	194	0,745	0,015		
6	178	0,756	0,030			6	195	0,746	0,016	0,000	219
6	179	0,756	0,030			6	196	0,741	0,010		
6	180	0,75	0,022	0,002	219	6	197	0,739	0,007		
6	181	0,75	0,022			6	198	0,745	0,015		
6	182	0,752	0,025			6	199	0,743	0,012		
6	183	0,752	0,025			6	200	0,743	0,012	0,001	219
6	184	0,748	0,019			6	201	0,743	0,012		
6	185	0,752	0,025	-0,001	219	6	202	0,743	0,012		
6	186	0,752	0,025			6	203	0,738	0,005		
6	187	0,747	0,018			6	204	0,737	0,004		
6	188	0,747	0,018			6	205	0,737	0,004	0,002	219
6	189	0,746	0,016			6	206	0,737	0,004		
6	190	0,746	0,016	0,002	219	6	207	0,737	0,004		
6	191	0,743	0,012			6	208	0,737	0,004		
6	192	0,745	0,015			6	209	0,734	0,000		

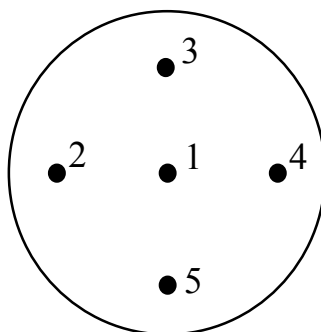
Додаток В

Визначення товщини флютингу

Для визначення товщини дослідних зразків використано флютинг з масою квадратного метру 112, 125, 140 г/м², що відповідають ДСТУ 7377-85, та нестандартний флютинг з масою квадратного метру 200 г/м². Флютинг виготовлено на ПрАТ "Київський картонно-паперовий комбінат".

Вимірювання товщини здійснювалось за допомогою мікрометра часового типу за ГОСТ 577-68 (ціна поділки шкали 0,01 мм, діапазоном вимірювання 0-25 мм).

Для визначення товщини флютингу відібрано по п'ять зразків з відповідними масами квадратного метру. Кожен зі зразків виміряно в п'яти різних точках. Схему вимірювання наведено на рисунку В.1.



1, 2, 3, 4, 5 – місця вимірювання товщини на зразку флютингу

Рисунок В.1 – Схема вимірювання товщини зразка флютингу

Результати вимірювання та розрахунку середнього значення товщини флютингу відповідно маси квадратного метру наведено в таблиці В.1.

Таблиця В.1 – Визначення товщини флютингу

Маса квадратного метру, г/м ²	№ зразку	Товщина флютингу, м					Середнє значення товщини зразку, мкм	Середнє значення товщини флютингу, мкм
		1*	2*	3*	4*	5*		
112	1	130	155	150	140	140	143	137
112	2	135	90	130	145	130	126	
112	3	150	140	150	125	120	137	
112	4	140	120	145	130	130	133	

Продовження таблиці В.1

112	5	130	170	120	130	170	144	
125	1	140	160	160	155	170	157	150
125	2	150	150	155	160	150	153	
125	3	175	135	145	140	160	151	
125	4	135	150	145	140	160	146	
125	5	170	130	130	160	130	144	
140	1	195	160	160	155	170	168	176
140	2	155	190	150	170	170	167	
140	3	180	170	205	200	180	187	
140	4	180	180	175	170	135	168	
140	5	215	180	210	180	170	191	
200	1	330	310	280	290	320	306	288
200	2	230	280	280	290	320	280	
200	3	290	290	280	295	280	287	
200	4	270	290	280	290	280	282	
200	5	260	340	275	270	290	287	

* – розташування місць вимірювання товщини зразку флютингу відповідно до рисунку В.1.

Додаток Г

Розрахунок похибок вимірювання

Г.1 Визначення похибок прямих вимірювань

Прямим вимірюванням підлягали вимірювання маси, температури поверхні та товщини флютингу, часу за вимірювання температури, відносної вологості та температури повітря над поверхнею флютингу, відстань між поверхнями інфрачервоного випромінювача та флютингу, електрорушійну силу в датчику теплового потоку (напругу), електричну потужність інфрачервоного випромінювача.

Величини, що підлягали вимірюванню та параметри приладів наведено в таблиці Г.1.

Таблиця Г.1 – Фізичні вимірювані величини та характеристика приладів

Величина	Прилад	Одиниці вимірювання	Діапазон вимірювання	Дискретність вимірювання	Гранична допустима похибка приладу, %
маса	ваги	г	0 - 60	0,001	0,002
температура флютингу	пірометр	°C	- 60 - +1000	1	0,1
товщина	мікрометр	мм	0 - 25	0,01	0,04
відносна вологість	гігрометр психрометричний	%	20 - 93	1	1,08
температура повітря	термометр	°C	0 - 50	0,2	0,4
час	секундомір	с	0 - 60	0,01	0,02
ЕРС	вольтметр	В	0 - 600	4	0,67
відстань	штангенциркуль	мм	0 - 150	0,1	0,07
потужність	ватметр	Вт	75 - 3000	20	0,67

Довірчий інтервал шуканої величини визначався з ймовірністю $\alpha = 0,95$ (ступінь ризику 0,05). Результати записувалися у вигляді:

$$x = \bar{x} \pm \Delta_{\Sigma} \quad (\text{Г.1})$$

де \bar{x} – середнє арифметичне значення фізичної величини;

Δ_{Σ} – значення абсолютної похибки вимірювання.

Г.1.1 Визначення похибок прямих вимірювань маси флютингу

Результати вимірювань маси флютингу на вагах наведено в таблиці Г.2.

Таблиця Г.2 – Результати вимірювань маси флютингу

№ досліду	Значення вимірювання, г	$(\bar{x} - x_i)^2, \text{г}^2$
1	1,785	$1 \cdot 10^{-6}$
2	1,783	$9 \cdot 10^{-6}$
3	1,789	$9 \cdot 10^{-6}$
4	1,784	$4 \cdot 10^{-6}$
5	1,787	$1 \cdot 10^{-6}$
	$\bar{x}=1,786$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 0,000024$

Розраховуємо середньоквадратичну похибку вимірювання маси флютингу:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{0,000024}{5 - 1}} = 0,0024 \text{ г}$$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{0,001}{3} = 0,0003 \text{ г}$$

Довірчий інтервал в долях середньоквадратичної похибки становить:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{S} = \frac{0,0003}{0,0024} = 0,136$$

Визначаємо сумарну похибку прямого вимірювання маси флютингу:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} = 0,001 + 2,8 \frac{0,0024}{\sqrt{5}} = 0,004 \text{ г},$$

де t_{α} – коефіцієнт Стюдента, що за ймовірності 0,95 та кількості вимірів $n=5$ становить 2,8.

Тоді дійсне значення маси флютингу визначається як:

$m = \overline{m} \pm \Delta_{\Sigma} = \overline{m} \pm 0,004 \text{ г},$
де \overline{m} – виміряне на вагах значення маси флютингу, г.

Г.1.2 Визначення похибок прямих вимірювань температури флютингу

Результати вимірювань температури флютингу пірометром наведено в таблиці Г.3.

Таблиця Г.3 – Результати вимірювань температури флютингу

№ досліду	Значення вимірювання, °C	$(\bar{x} - x_i)^2, ^\circ\text{C}^2$
1	180	0
2	180	0
3	181	1
4	180	0
5	179	1
	$\bar{x}=180$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 2$

Розраховуємо середньоквадратичну похибку вимірювання температури флютингу:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{2}{5 - 1}} = 0,707 ^\circ\text{C}$$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{1}{3} = 0,333 ^\circ\text{C}$$

Довірчий інтервал в долях середньоквадратичної похибки становить:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{s} = \frac{0,333}{0,707} = 0,471$$

Визначаємо сумарну похибку прямого вимірювання температури флютингу:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} = 1 + 2,8 \frac{0,707}{\sqrt{5}} = 1,885 ^\circ\text{C}$$

де t_{α} – коефіцієнт Стюдента, що за ймовірності 0,95 та кількості вимірів $n=5$ становить 2,8.

Тоді дійсне значення температури флютингу визначається як:

$$t = \bar{t} \pm \Delta_{\Sigma} = \bar{t} \pm 1,885 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

де \bar{t} – виміряне пірометром значення температури флютингу, $^{\circ}\text{C}$.

Г.1.3 Визначення похибок прямих вимірювань товщини флютингу

Результати вимірювань товщини флютингу мікрометром наведено в таблиці Г.4.

Таблиця Г.4 – Результати вимірювань товщини флютингу

№ досліду	Значення, мм	$(\bar{x} - x_i)^2$, мм ²
1	0,13	$14,4 \cdot 10^{-5}$
2	0,15	$6,4 \cdot 10^{-5}$
3	0,15	$6,4 \cdot 10^{-5}$
4	0,14	$4 \cdot 10^{-6}$
5	0,14	$4 \cdot 10^{-6}$
	$\bar{x}=0,142$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 0,00028$

Розраховуємо середньоквадратичну похибку вимірювання товщини флютингу:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{0,00028}{5 - 1}} = 0,008 \text{ мм}$$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{0,01}{3} = 0,003 \text{ мм}$$

Довірчий інтервал в долях середньоквадратичної похибки становить:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{s} = \frac{0,003}{0,008} = 0,398$$

Визначаємо сумарну похибку прямого вимірювання товщини флютингу:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} = 0,01 + 2,8 \frac{0,008}{\sqrt{5}} = 0,02 \text{ мм}$$

де t_{α} – коефіцієнт Стюдента, що за ймовірності 0,95 та кількості вимірів $n=5$ становить 2,8.

Тоді дійсне значення товщини флютингу визначається як:

$$\delta_f = \overline{\delta_f} \pm \Delta_{\Sigma} = \overline{\delta_f} \pm 0,02 \text{ мм}$$

де $\overline{\delta_f}$ – вимірне мікрометром значення товщини флютингу, мм.

Г.1.4 Визначення похибок прямих вимірювань температури повітря

Результати вимірювань температури повітря лабораторним термометром наведено в таблиці Г.5.

Таблиця Г.5 – Результати вимірювань температури повітря

№ досліду	Значення, °C	$(\bar{x} - x_i)^2$, °C ²
1	24,4	0,102
2	23,8	0,078
3	24,2	0,014
4	23,8	0,078
5	24,2	0,014
	$\bar{x}=24,08$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 0,288$

Розраховуємо середньоквадратичну похибку вимірювання температури повітря поблизу поверхні флютингу:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{0,288}{5 - 1}} = 0,268 \text{ °C}$$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{0,2}{3} = 0,067 \text{ °C}$$

Довірчий інтервал в долях середньоквадратичної похибки становить:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{s} = \frac{0,067}{0,268} = 0,248$$

Визначаємо сумарну похибку прямого вимірювання температури повітря:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{\alpha} \frac{s}{\sqrt{n}} = 0,2 + 2,8 \frac{0,268}{\sqrt{5}} = 0,536 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

де t_{α} – коефіцієнт Стюдента, що за ймовірності 0,95 та кількості вимірів $n=5$ становить 2,8.

Тоді дійсне значення температури повітря визначається як:

$$t_{air} = \overline{t_{air}} \pm \Delta_{\Sigma} = \overline{t_{air}} \pm 0,536 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

де $\overline{t_f}$ – виміряне лабораторним термометром значення температури повітря, $^{\circ}\text{C}$.

Г.1.5 Визначення похибок прямих вимірювань вологості повітря

Вологість повітря визначалась різницею показань сухого та мокрого термометрів лабораторного гігрометра психрометричного. Показання термометрів наведено в таблиці Г.6.

Таблиця Г.6 – Результати вимірювань вологості повітря

№ досліду	Значення, $^{\circ}\text{C}$		$(\bar{x} - x_i)^2$, $^{\circ}\text{C}^2$	
	сухий термометр	мокрый термометр	сухий термометр	мокрый термометр
1	23,8	20,2	0,04	0,058
2	24,2	19,8	0,04	0,026
3	24	19,8	0	0,026
4	23,8	20	0,04	0,002
5	24,2	20	0,04	0,002
	$\bar{x}=24$	$\bar{x}=19,96$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2$	
			0,16	0,112

Розраховуємо середньоквадратичну похибку вимірювання температури:

- сухого термометру

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,16}{5-1}} = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- мокрого термометру

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,112}{5-1}} = 0,167 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Визначаємо допустиме значення раптові похибки сухого та мокрого термометрів:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{0,2}{3} = 0,067 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Довірчий інтервал в долях середньоквадратичної похибки становить:

- сухого термометру

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{s} = \frac{0,067}{0,2} = 0,333$$

- мокрого термометру

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{s} = \frac{0,067}{0,167} = 0,398$$

Визначаємо сумарну похибку прямого вимірювання температури:

- сухого термометру

$$\Delta_\Sigma = \delta + t_\alpha \frac{S}{\sqrt{n}} = 0,2 + 2,8 \frac{0,2}{\sqrt{5}} = 0,45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- мокрого термометру

$$\Delta_\Sigma = \delta + t_\alpha \frac{S}{\sqrt{n}} = 0,2 + 2,8 \frac{0,167}{\sqrt{5}} = 0,41 \text{ } ^\circ\text{C}$$

де t_α – коефіцієнт Стюдента, що за ймовірності 0,95 та кількості вимірів $n=5$ становить 2,8.

Тоді дійсне значення температури сухого термометру визначається як:

$$t_{\text{сух}} = \overline{t_{\text{сух}}} \pm \Delta_\Sigma = \overline{t_{\text{сух}}} \pm 0,45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

де $\overline{t_{\text{сух}}}$ – значення температури повітря, виміряне сухим термометром, $^\circ\text{C}$.

Дійсне значення температури мокрого термометру визначається як:

$$t_{\text{мок}} = \overline{t_{\text{мок}}} \pm \Delta_\Sigma = \overline{t_{\text{мок}}} \pm 0,45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

де $\overline{t_{\text{мок}}}$ – значення температури повітря, виміряне мокрим термометром, $^\circ\text{C}$.

Г.1.6 Визначення похибок прямих вимірювань ЕРС, що протікає через датчик теплового потоку

Результати вимірювань ЕРС, що протікає через датчик теплового потоку і вимірюється вольтметром, наведено в таблиці Г.7.

Таблиця Г.7 – Результати вимірювань ЕРС

№ досліду	Значення, В	$(\bar{x} - x_i)^2, \text{В}^2$
1	60	0
2	64	16
3	56	16
4	60	0
5	60	0
	$\bar{x}=60$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 32$

Розраховуємо середньоквадратичну похибку вимірювання ЕРС:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{32}{5 - 1}} = 2,828 \text{ В}$$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{4}{3} = 1,333 \text{ В}$$

Довірчий інтервал в долях середньоквадратичної похибки становить:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{S} = \frac{1,333}{2,828} = 0,471$$

Визначаємо сумарну похибку прямого вимірювання ЕРС:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} = 4 + 2,8 \frac{2,828}{\sqrt{5}} = 7,542 \text{ В}$$

де t_{α} – коефіцієнт Стюдента, що за ймовірності 0,95 та кількості вимірів $n=5$ становить 2,8.

Тоді дійсне значення товщини флютингу визначається як:

$$U_{\text{ЕРС}} = \overline{U_{\text{ЕРС}}} \pm \Delta_{\Sigma} = \overline{U_{\text{ЕРС}}} \pm 7,542 \text{ В}$$

де $\overline{U_{\text{ЕРС}}}$ – виміряне вольтметром значення ЕРС, що протікає через датчик теплового потоку, В.

Г.1.7 Визначення похибок прямих вимірювань електричної потужності інфрачервоного випромінювача

Результати вимірювань електричної потужності інфрачервоного випромінювача наведено в таблиці Г.8.

Таблиця Г.8 – Результати вимірювань потужності ІЧ випромінювача

№ досліду	Значення, Вт	$(\bar{x} - x_i)^2$, Вт ²
1	640	64
2	620	144
3	620	144
4	640	64
5	640	64
	$\bar{x}=632$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 480$

Розраховуємо середньоквадратичну похибку вимірювання потужності:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{480}{5 - 1}} = 10,95 \text{ Вт}$$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{20}{3} = 6,67 \text{ Вт}$$

Довірчий інтервал в долях середньоквадратичної похибки становить:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{s} = \frac{6,67}{10,95} = 0,609$$

Визначаємо сумарну похибку прямого вимірювання потужності:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} = 20 + 2,8 \frac{10,95}{\sqrt{5}} = 33,72 \text{ Вт}$$

де t_{α} – коефіцієнт Стюдента, що за ймовірності 0,95 та кількості вимірів $n=5$ становить 2,8.

Тоді дійсне значення температури повітря визначається як:

$$W = \bar{W} \pm \Delta_{\Sigma} = \bar{W} \pm 33,72 \text{ Вт}$$

де \bar{W} – виміряне ватметром значення електричної потужності ІЧ випромінювача, Вт.

Г.1.8 Визначення похибок прямих вимірювань відстані між інфрачервоним випромінювачем та поверхнею флютингу

Результати вимірювань відстані між робочою поверхнею ІЧ випромінювача та поверхнею флютингу наведено в таблиці Г.9.

Таблиця Г.9 – Результати вимірювань відстані

№ досліду	Значення, мм	$(\bar{x} - x_i)^2$, мм ²
1	130,1	0,0064
2	130,1	0,0064
3	130,2	0,0004
4	130	0,0324
5	130,5	0,102
	$\bar{x}=130,18$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 0,148$

Розраховуємо середньоквадратичну похибку вимірювання відстані:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{0,148}{5 - 1}} = 0,192 \text{ мм}$$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{0,1}{3} = 0,033 \text{ мм}$$

Довірчий інтервал в долях середньоквадратичної похибки становить:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{s} = \frac{0,033}{0,192} = 0,173$$

Визначаємо сумарну похибку прямого вимірювання відстані:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} = 0,1 + 2,8 \frac{0,192}{\sqrt{5}} = 0,341 \text{ мм}$$

де t_{α} – коефіцієнт Стюдента, що за ймовірності 0,95 та кількості вимірів $n=5$ становить 2,8.

Тоді дійсне значення відстані між робочою поверхнею ІЧ випромінювача та поверхнею флютингу визначається як:

$$H = \bar{H} \pm \Delta_{\Sigma} = \bar{H} \pm 0,341 \text{ мм}$$

де \bar{H} – виміряне штангенциркулем значення відстані, мм.

Г.1.9 Визначення похибок прямих вимірювань часу

Результати вимірювань часу секундоміром, коли визначалась температура поверхні флютингу, наведено в таблиці Г.10.

Таблиця Г.10 – Результати вимірювань часу

№ досліду	Значення, с	$(\bar{x} - x_i)^2, \text{с}^2$
1	4,98	0,0049
2	4,65	0,0676
3	4,88	0,0009
4	5,15	0,0576
5	4,89	0,0004
	$\bar{x}=4,91$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 0,131$

Розраховуємо середньоквадратичну похибку вимірювання часу:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{0,131}{5 - 1}} = 0,181 \text{ с}$$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{0,01}{3} = 0,003 \text{ с}$$

Довірчий інтервал в долях середньоквадратичної похибки становить:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{s} = \frac{0,003}{0,181} = 0,018$$

Визначаємо сумарну похибку прямого вимірювання часу:

$$\Delta_\Sigma = \delta + t_\alpha \frac{S}{\sqrt{n}} = 0,01 + 2,8 \frac{0,181}{\sqrt{5}} = 0,237 \text{ с}$$

де t_α – коефіцієнт Стюдента, що за ймовірності 0,95 та кількості вимірів $n=5$ становить 2,8.

Тоді дійсне значення часу визначається як:

$$\tau = \bar{\tau} \pm \Delta_\Sigma = \bar{\tau} \pm 0,237 \text{ с}$$

де $\bar{\tau}$ – виміряне секундоміром значення часу, с.

Г.2 Визначення похибок непрямих вимірювань

Непрямим вимірюванням підлягають визначення вологовмісту флютингу та швидкості сушіння.

Зазначені величини є функцією багатьох змінних $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$. Тому абсолютне значення похибки визначаємо за такою залежністю [XXX]:

$$\Delta Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \Delta_{\Sigma i} \right)^2}, \quad (\text{Г.2})$$

де $\frac{\partial f}{\partial X_i}$ – часткова похідна по змінній X_i ;

$\Delta_{\Sigma i}$ – сумарна абсолютна похибка по змінній X_i .

Г.2.1 Визначення похибок непрямих вимірювань вологовмісту флютингу

Вологовміст флютингу за результатами вимірювань маси визначається за формулою:

$$u_i = \frac{m_i - m_{\text{асф}}}{m_{\text{асф}}}, \quad (\text{Г.3})$$

де m_i – поточне значення маси зразку вологого флютингу, г;

$m_{\text{асф}}$ – маса абсолютно сухого зразку флютингу, г.

Значення маси волого флютингу під час сушіння змінювалося, а маса абсолютно сухого флютингу для даного зразку є константою. Тоді похибка вимірювання вологовмісту флютингу становить:

$$\Delta u = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial m_i} \Delta_{\Sigma m}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{m_{\text{асф}}} \Delta_{\Sigma m}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{1,785} \cdot 0,004\right)^2} = 0,00224 \text{ кг/кг}$$

Результат визначення вологовмісту флютингу становить:

$$u = \bar{u} \pm \Delta u = \bar{u} \pm 0,00224 \text{ кг/кг}$$

Г.2.2 Визначення похибок непрямих вимірювань швидкості сушіння флютингу

Швидкість сушіння флютингу за результатами вимірювань маси та часу визначається за формулою:

$$W_{\text{суш}} = \frac{\Delta u}{\Delta \tau} = \frac{\Delta\left(\frac{m_i - m_{\text{асф}}}{m_{\text{асф}}}\right)}{\Delta \tau} = \frac{\frac{\Delta m_i}{m_{\text{асф}}}}{\Delta \tau} = \frac{\Delta m_i}{m_{\text{асф}} \cdot \Delta \tau}, \quad (\text{Г.4})$$

де $\Delta \tau$ – час сушіння, протягом якого осереднюється швидкість, с.

Під час сушіння змінювалися значення маси волого флютингу та час, а маса абсолютно сухого флютингу для даного зразку є константою. Тоді похибка вимірювання швидкості сушіння флютингу становить:

$$\begin{aligned} W_{\text{суш}} &= \sqrt{\left(\frac{\partial W_{\text{суш}}}{\partial m_i} \Delta_{\Sigma m}\right)^2 + \left(\frac{\partial W_{\text{суш}}}{\partial \tau} \Delta_{\Sigma \tau}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{m_{\text{асф}} \Delta \tau} \Delta_{\Sigma m}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta m_i}{m_{\text{асф}} \cdot \Delta \tau^2} \Delta_{\Sigma \tau}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{1,505 \cdot (50 - 30)} \cdot 0,004\right)^2 + \left(-\frac{3,467 - 3,092}{(50 - 30)^2} \cdot 0,237\right)^2} = \\ &= 2,589 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(кг} \cdot \text{с)} \end{aligned}$$

Результат визначення швидкості сушіння флютингу становить:

$$W_{\text{суш}} = \overline{W_{\text{суш}}} \pm \Delta W_{\text{суш}} = \overline{W_{\text{суш}}} \pm 2,589 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(кг} \cdot \text{с)}$$

Додаток Д

Перевірка адекватності математичної моделі

Для перевірки адекватності математичної моделі у розділі 3 визначено відповідність розрахункових даних експериментальним.

Основними параметрами розрахунку математичної моделі є поточні значення вологовмісту та температури. Приклад розрахункових та експериментальних даних наведено в таблиці Д1.

Таблиця Д1. – Розрахункові та експериментальні дані

Час, с	Вологовміст, кг/кг		Температура, °С		Час, с	Вологовміст, кг/кг		Температура, °С	
	Розрах.	Експерим.	Розрах.	Експерим.		Розрах.	Експерим.	Розрах.	Експерим.
0	1,396	1,396	24	24	23	1,077	1,087		
1	1,395	1,392			24	1,059	1,064		
2	1,395	1,389			25	1,042	1,052	89,1	88,1
3	1,392	1,387			26	1,024	1,032		
4	1,384	1,374			27	1,006	1,005		
5	1,376	1,366	75,1	62,1	28	0,989	0,992		
6	1,365	1,36			29	0,971	0,969		
7	1,351	1,348			30	0,953	0,961	89,1	88,6
8	1,337	1,341			31	0,936	0,933		
9	1,321	1,318			32	0,918	0,918		
10	1,305	1,31	87,6	74,6	33	0,900	0,899		
11	1,288	1,297			34	0,883	0,883		
12	1,271	1,285			35	0,865	0,866	89,1	89,8
13	1,253	1,266			36	0,847	0,854		
14	1,236	1,248			37	0,830	0,832		
15	1,218	1,23	89	83,9	38	0,812	0,817		
16	1,201	1,209			39	0,794	0,795		
17	1,183	1,195			40	0,777	0,770	89,2	92,4
18	1,165	1,174			41	0,759	0,758		
19	1,148	1,161			42	0,741	0,733		
20	1,13	1,144	89,1	86	43	0,724	0,723		
21	1,112	1,13			44	0,706	0,707		
22	1,095	1,103			45	0,688	0,682	89,2	94,7

Продовження таблиці Д1

Час, с	Вологовміст, кг/кг		Температура, °С		Час, с	Вологовміст, кг/кг		Температура, °С	
	Розрах.	Експерим.	Розрах.	Експерим.		Розрах.	Експерим.	Розрах.	Експерим.
46	0,671	0,667			78	0,209	0,200		
47	0,653	0,648			79	0,201	0,191		
48	0,635	0,631			80	0,193	0,187	175,6	136,1
49	0,618	0,620			81	0,185	0,172		
50	0,600	0,591	89,2	96,6	82	0,178	0,165		
51	0,582	0,584			83	0,171	0,158		
52	0,565	0,570			84	0,165	0,153		
53	0,547	0,556			85	0,158	0,150	187,3	156,5
54	0,529	0,542			86	0,152	0,145		
55	0,512	0,517	89,2	98,6	87	0,146	0,137		
56	0,494	0,509			88	0,140	0,130		
57	0,476	0,493			89	0,135	0,132		
58	0,459	0,479			90	0,130	0,126	195,7	174,3
59	0,441	0,462			91	0,125	0,126		
60	0,425	0,435	94,5	100,9	92	0,120	0,117		
61	0,408	0,427			93	0,115	0,118		
62	0,393	0,409			94	0,111	0,115		
63	0,377	0,396			95	0,107	0,111	201,8	191,3
64	0,363	0,380			96	0,102	0,111		
65	0,349	0,373	115,6	103	97	0,098	0,106		
66	0,335	0,350			98	0,095	0,106		
67	0,322	0,334			99	0,091	0,106		
68	0,310	0,313			100	0,087	0,106	206,3	200
69	0,297	0,311			101	0,084	0,106		
70	0,286	0,301	138,8	108,4	102	0,081	0,103		
71	0,275	0,287			103	0,078	0,099		
72	0,264	0,270			104	0,075	0,098		
73	0,254	0,260			105	0,072	0,091	209,7	205
74	0,244	0,247			106	0,069	0,093		
75	0,235	0,234	159,5	118,1	107	0,066	0,089		
76	0,226	0,223			108	0,064	0,090		
77	0,217	0,209			109	0,061	0,090		

Продовження таблиці Д1

Час, с	Вологовміст, кг/кг		Температура, °С		Час, с	Вологовміст, кг/кг		Температура, °С	
	Розрах.	Експерим.	Розрах.	Експерим.		Розрах.	Експерим.	Розрах.	Експерим.
110	0,059	0,090	212,3	210	142	0,017	0,048		
111	0,057	0,090			143	0,016	0,035		
112	0,054	0,086			144	0,015	0,038		
113	0,052	0,083			145	0,015	0,046	220,1	219
114	0,050	0,083			146	0,014	0,039		
115	0,048	0,083	214,3	212	147	0,014	0,036		
116	0,046	0,083			148	0,013	0,030		
117	0,045	0,077			149	0,013	0,030		
118	0,043	0,075			150	0,012	0,030	220,5	220
119	0,041	0,075			151	0,012	0,030		
120	0,040	0,075	215,9	214	152	0,011	0,028		
121	0,038	0,075			153	0,011	0,034		
122	0,037	0,075			154	0,010	0,027		
123	0,035	0,066			155	0,010	0,027	220,8	221
124	0,034	0,066			156	0,010	0,027		
125	0,033	0,070	217,2	216	157	0,009	0,020		
126	0,031	0,067			158	0,009	0,012		
127	0,030	0,060			159	0,008	0,011		
128	0,029	0,056			160	0,008	0,019	221,0	221
129	0,028	0,070			161	0,008	0,019		
130	0,027	0,059	218,2	217	162	0,008	0,020		
131	0,026	0,059			163	0,007	0,013		
132	0,025	0,051			164	0,007	0,011		
133	0,024	0,051			165	0,007	0,004	221,2	221
134	0,023	0,044			166	0,006	0,004		
135	0,022	0,047	219,0	218	167	0,006	0,008		
136	0,021	0,048			168	0,006	0,007		
137	0,020	0,047			169	0,006	0,007		
138	0,019	0,046			170	0,006	0,007	221,4	222
139	0,019	0,046			171	0,005	0,007		
140	0,018	0,046	219,6	218	172	0,005	0,007		
141	0,017	0,046			173	0,005	0,007		

Продовження таблиці Д1

Час, с	Вологовміст, кг/кг		Температура, °С		Час, с	Вологовміст, кг/кг		Температура, °С	
	Розрах.	Експерим.	Розрах.	Експерим.		Розрах.	Експерим.	Розрах.	Експерим.
174	0,005	0,003			185	0,003	0,003	221,7	222
175	0,005	0,003	221,5	223	186	0,003	0,003		
176	0,004	0,007			187	0,003	0,000		
177	0,004	0,007			188	0,003	0,000		
178	0,004	0,001			189	0,003	0,001		
179	0,004	-0,003			190	0,002	0,001	221,8	223
180	0,004	0,001	221,6	223	191	0,002	0,000		
181	0,004	0,003			192	0,002	0,000		
182	0,003	0,005			193	0,002	0,000		
183	0,003	0,001			194	0,002	0,000		
184	0,003	0,003							

Додаток Е

Розрахунок економічного ефекту від застосування енергії інфрачервоного випромінювання

Визначимо кількість теплоти, що передається до флютингу від водяної пари, що виробляється шляхом спалювання 1 м^3 природного газу:

$$Q_{\text{пг}} = Q_{\text{р}}^{\text{н}} \eta_{\text{к}} \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{тепл}} = 31,8 \cdot 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,9 = 20,61 \text{ МДж/м}^3$$

де $Q_{\text{р}}^{\text{н}}$ – нижча питома теплота згорання природного газу, МДж/м³; $\eta_{\text{к}}$ – ККД парового котла; $\eta_{\text{тр}}$ – коефіцієнт втрат теплоти під час транспортування водяної пари; $\eta_{\text{тепл}}$ – коефіцієнт втрат теплоти під час теплопередачі від пари, що конденсується до флютингу. [119]

Вартість 1 МДж теплоти, наданої флютингу від водяної пари сушильним циліндром:

$$C_{1\text{пг}} = \frac{C_{\text{пг}}}{1000 \cdot Q_{\text{пг}}} = \frac{6689}{1000 \cdot 20,61} = 0,325 \text{ грн/МДж}$$

де $C_{\text{пг}}$ – вартість 1000 м³ природного газу для підприємств в Україні, грн [112].

Визначимо кількість теплоти, що передається до флютингу від інфрачервоного випромінювача з електричною потужністю 1 кВт протягом години:

$$\begin{aligned} Q_{\text{IR}} &= W_{\text{IR}} \tau \eta_{\text{IR}} \eta_{\text{втр}} \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{ф}} = 1 \cdot 3600 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,97 = \\ &= 2546 \text{ кДж} = 2,546 \text{ МДж} \end{aligned}$$

де η_{IR} – ККД інфрачервоного випромінювача по перетворенню електричної енергії в ІЧВ [56, 78]; $\eta_{\text{втр}}$ – доля втрат ІЧВ від інфрачервоного випромінювача в навколишнє середовище [76]; $\eta_{\text{тр}}$ – доля втрат теплоти у зв'язку з розсіюванням ІЧВ, поглинанням ІЧВ парогазовою сумішшю між випромінювачем та флютингом [76]; $\eta_{\text{ф}}$ ступінь поглинання ІЧВ флютингом [56].

Вартість витраченої електроенергії таким пристроєм протягом години рівна тарифу електроенергії (кВт·год). Звідси вартість 1 МДж теплоти, наданої флютингу від інфрачервоних випромінювачів визначається за формулою:

$$C_{IR} = \frac{C_{\text{кВт}\cdot\text{год}}}{1000 \cdot Q_{IR}} \tau, \text{ грн/МДж} \quad (\text{E.1})$$

де $C_{\text{кВт}\cdot\text{год}}$ – вартість 1 кВт·год електроенергії; τ – час процесу, рівний 1 секундi, с; 1000 – переведення тарифу в МВт·год.

Вартість тарифу електроенергії $C_{\text{кВт}\cdot\text{год}}$ залежить від типу та підтипу тарифікації (згідно таблиці 4.1).

Зменшення вартості витрат завдяки заміни контактного способу сушіння радіаційним за передачі 1 МДж теплоти визначається за формулою:

$$\Delta C_Q = C_{1\text{пт}} - C_{IR}, \text{ грн/МДж} \quad (\text{E.2})$$

Результати розрахунку наведено в таблиці E1. Знак мінус означає, що питомі витрати за радіаційного способу вищі, ніж за контактного.

Таблиця E1 – Вартість 1МВт теплоти

Тип тарифікації	Підтип тарифікації	Вартість C_{IR} , грн/МДж (*)	Середнє значення вартості C_{IR} , грн/МДж (*)	
однозонна	–	0,562 (-0,238)	–	
двозонна	нічний	0,197 (0,128)	0,74 (-0,416)	
	денний	1,012 (-0,688)		
тризонна	нічний	0,141 (0,184)	0,405 (-0,081)	0,557 (-0,232)
	напівпіковий	0,574 (-0,249)		
	піковий	1,012 (-0,688)	–	

* – значення вартості зменшення витрат ΔC_Q , грн/МДж

Як видно з таблиці E1, позитивний економічний ефект від заміни контактного способу сушіння на радіаційний спостерігається за багатозонної тарифікації електроенергії в нічний період.

Річний ефект застосування ІЧВ для сушіння флютингу залежить від характеристик ПРМ. Визначимо річний економічний ефект (гривень на рік) від заміни контактного способу сушіння на радіаційний в періоді нагрівання для типової ПРМ. Характеристики ПРМ наведено в таблиці Е2.

Таблиця Е2 – Параметри ПРМ для виготовлення флютингу

Параметр	Значення
маса квадратного метру g , кг/м ²	0,112; 0,125; 0,140; 0,2
швидкість папероробної машини V , м/с (м/хв)	6,67 (400)
початкова сухість флютингу S_0	0,4
кінцева сухість флютингу S_k	0,94
ширина полотна флютингу B , м	4,25
тиск пари в сушильному циліндрі $P_{\text{вп}}$, МПа	0,5
діаметр сушильного циліндра D , м	1,5
початкова температура флютингу t_0 , °C	20
температура флютингу в першому періоді $t_{1\text{п}}$, °C	94

Визначаємо продуктивність машини по абсолютно сухому флютингу за різної маси квадратного метру [119]:

– за $g = 112$ г/м²

$$G_{\text{асф}} = BVgS_k = 4,25 \cdot 6,67 \cdot 0,112 \cdot 0,94 = 2,98 \text{ кг/с}$$

– за $g = 125$ г/м²

$$G_{\text{асф}} = BVgS_k = 4,25 \cdot 6,67 \cdot 0,125 \cdot 0,94 = 3,33 \text{ кг/с}$$

– за $g = 140$ г/м²

$$G_{\text{асф}} = BVgS_k = 4,25 \cdot 6,67 \cdot 0,14 \cdot 0,94 = 3,73 \text{ кг/с}$$

– за $g = 200$ г/м²

$$G_{\text{асф}} = BVgS_k = 4,25 \cdot 6,67 \cdot 0,2 \cdot 0,94 = 4,63 \text{ кг/с}$$

Вологовміст полотна флютингу становить:

– на початку періоду нагрівання

$$u_0 = \frac{1 - s_0}{s_0} = \frac{1 - 0,4}{0,4} = 1,5 \text{ кг/кг}$$

– на початку періоду постійної швидкості [84]

$$u_1 = 0,9u_0 = 0,9 \cdot 1,5 = 1,35 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

Середня температура флютингу в періоді нагрівання:

$$t_{\text{нагр}} = \frac{t_0 + t_{1п}}{2} = \frac{20 + 94}{2} = 57 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Коефіцієнт теплопередачі до полотна флютингу визначається як:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{сц}}}{\lambda_{\text{сц}}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{3500} + \frac{0,025}{50} + \frac{1}{600}} = 408 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від пари до внутрішньої стінки циліндра, Вт/(м² °C); $\delta_{\text{сц}}$ – товщина стінки сушильного циліндра, м; $\lambda_{\text{сц}}$ – коефіцієнт теплопровідності стінки сушильного циліндра, Вт/(м²К); α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої стінки циліндра до картонного полотна, Вт/(м² °C). [119].

Знаходимо густину теплового потоку до флютингу під час сушіння в періоді нагрівання:

$$q_{\text{нагр}} = k(t_s - t_{\text{нагр}}) = 408 \cdot (159 - 57) = 41616 \text{ Вт/м}^2$$

де t_s – температура насичення водяної пари за даного тиску, °C.

Знаходимо кількість теплоти, що поглинається полотном флютингу в період нагрівання протягом однієї секунди за різної маси квадратного метру:

– за $g = 112 \text{ г/м}^2$

$$\begin{aligned} Q_{\text{нагр}} &= \frac{1}{\psi_{\text{нагр}}} G_{\text{асф}} [(c_{\text{ф}} + u_1 c_w)(t_{1п} - t_0) + (u_0 - u_1)r_{\text{нагр}}] = \\ &= \frac{1}{1} \cdot 2,98 \cdot [(1,46 + 1,35 \cdot 4,19)(94 - 20) + (1,5 - 1,35) \cdot 2280] \\ &= 2591 \text{ кВт} = 2,591 \text{ МВт} \end{aligned}$$

де $c_{\text{ф}}$, c_w – масові теплоємкості флютингу та води, кДж/(кг·К); $r_{\text{нагр}}$ – питома теплота випаровування води, кДж/кг.

– за $g = 125 \text{ г/м}^2$

$$\begin{aligned}
Q_{\text{нагр}} &= \frac{1}{\psi_{\text{нагр}}} G_{\text{асф}} [(c_{\phi} + u_1 c_w)(t_{1\text{п}} - t_0) + (u_0 - u_1)r_{\text{нагр}}] = \\
&= \frac{1}{1} \cdot 3,33 \cdot [(1,46 + 1,35 \cdot 4,19)(94 - 20) + (1,5 - 1,35) \cdot 2280] \\
&= 2892 \text{ кВт} = 2,892 \text{ МВт}
\end{aligned}$$

– за $g = 140 \text{ г/м}^2$

$$\begin{aligned}
Q_{\text{нагр}} &= \frac{1}{\psi_{\text{нагр}}} G_{\text{асф}} [(c_{\phi} + u_1 c_w)(t_{1\text{п}} - t_0) + (u_0 - u_1)r_{\text{нагр}}] = \\
&= \frac{1}{1} \cdot 3,73 \cdot [(1,46 + 1,35 \cdot 4,19)(94 - 20) + (1,5 - 1,35) \cdot 2280] \\
&= 3239 \text{ кВт} = 3,239 \text{ МВт}
\end{aligned}$$

– за $g = 200 \text{ г/м}^2$

$$\begin{aligned}
Q_{\text{нагр}} &= \frac{1}{\psi_{\text{нагр}}} G_{\text{асф}} [(c_{\phi} + u_1 c_w)(t_{1\text{п}} - t_0) + (u_0 - u_1)r_{\text{нагр}}] = \\
&= \frac{1}{1} \cdot 4,63 \cdot [(1,46 + 1,35 \cdot 4,19)(94 - 20) + (1,5 - 1,35) \cdot 2280] \\
&= 4627 \text{ кВт} = 4,627 \text{ МВт}
\end{aligned}$$

Визначимо річний економічний ефект (гривень на рік) від заміни контактного способу сушіння на радіаційний в періоді нагрівання.

За двозонної тарифікації в нічний період:

– за $g = 112 \text{ г/м}^2$

$$\Delta C_p = 3600 \Delta C \tau_p \tau_d = 3600 \cdot 0,128 \cdot 350 \cdot 8 \cdot 2,591 = 3338018 \text{ грн/рік}$$

де 3600 – переведення часу в секунди; τ_p – кількість робочих днів для ПРМ в році, днів; τ_d – кількість годин в нічному періоді за відповідної тарифікації електроенергії, год.

– за $g = 125 \text{ г/м}^2$

$$\Delta C_p = 3600 \Delta C \tau_p \tau_d = 3600 \cdot 0,128 \cdot 350 \cdot 8 \cdot 2,892 = 3725467 \text{ грн/рік}$$

– за $g = 140 \text{ г/м}^2$

$$\Delta C_p = 3600 \Delta C \tau_p \tau_d = 3600 \cdot 0,128 \cdot 350 \cdot 8 \cdot 3,239 = 4172523 \text{ грн/рік}$$

– за $g = 200 \text{ г/м}^2$

$$\Delta C_p = 3600 \Delta C \tau_p \tau_d = 3600 \cdot 0,128 \cdot 350 \cdot 8 \cdot 4,627 = 5960747 \text{ грн/рік}$$

За тризонної тарифікації в нічний період:

– за $g = 112 \text{ г/м}^2$

$$\Delta C_p = 3600 \Delta C \tau_p \tau_d = 3600 \cdot 0,184 \cdot 350 \cdot 7 \cdot 2,591 = 4205762 \text{ грн/рік}$$

– за $g = 125 \text{ г/м}^2$

$$\Delta C_p = 3600 \Delta C \tau_p \tau_d = 3600 \cdot 0,184 \cdot 350 \cdot 7 \cdot 2,892 = 4693930 \text{ грн/рік}$$

– за $g = 140 \text{ г/м}^2$

$$\Delta C_p = 3600 \Delta C \tau_p \tau_d = 3600 \cdot 0,184 \cdot 350 \cdot 7 \cdot 3,239 = 5257202 \text{ грн/рік}$$

– за $g = 200 \text{ г/м}^2$

$$\Delta C_p = 3600 \Delta C \tau_p \tau_d = 3600 \cdot 0,184 \cdot 350 \cdot 7 \cdot 4,627 = 5170289 \text{ грн/рік}$$

Визначимо питомі зменшення затрат (гривень на тонну виготовленого флютингу) завдяки використанню енергії ІЧВ в порівнянні з контактним:

$$\begin{aligned} \Delta C_m &= \frac{\Delta C_Q Q_{\text{нагр}}}{G_{\text{асф}}} = \frac{\Delta C_Q \cdot \frac{1}{\psi_{\text{нагр}}} G_{\text{асф}} [(c_{\text{ф}} + u_1 c_w)(t_{1\text{п}} - t_0) + (u_0 - u_1) r_{\text{нагр}}]}{G_{\text{асф}}} \quad (\text{E.3}) \\ &= \Delta C_Q \cdot \frac{1}{\psi_{\text{нагр}}} [(c_{\text{ф}} + u_1 c_w)(t_{1\text{п}} - t_0) + (u_0 - u_1) r_{\text{нагр}}] \end{aligned}$$

де ΔC_Q – зменшення вартості витрат, грн/МДж; $Q_{\text{нагр}}$ – тепловий потік до флютингу в період нагрівання, МВт; $G_{\text{асф}}$ – продуктивність ПРМ по абсолютно сухому флютингу, т/с.

Таким чином питомі зменшення затрат ΔC_m , грн/т не залежать від маси квадратного метру флютингу, а залежать від типу тарифікації:

– за двозонної тарифікації електроенергії в нічний період

$$\begin{aligned}
\Delta C_m &= \Delta C_Q \cdot \frac{1}{\psi_{\text{нагр}}} [(c_\phi + u_1 c_w)(t_{1\text{п}} - t_0) + (u_0 - u_1)r_{\text{нагр}}] = \\
&= 0,128 \cdot \frac{1}{1} \cdot [(1,46 + 1,35 \cdot 4,19)(94 - 20) + (1,5 - 1,35) \cdot 2280] \\
&= 111 \text{ грн/тонну}
\end{aligned}$$

– за тризонної тарифікації електроенергії в нічний період

$$\begin{aligned}
\Delta C_m &= \Delta C_Q \cdot \frac{1}{\psi_{\text{нагр}}} [(c_\phi + u_1 c_w)(t_{1\text{п}} - t_0) + (u_0 - u_1)r_{\text{нагр}}] = \\
&= 0,184 \cdot \frac{1}{1} \cdot [(1,46 + 1,35 \cdot 4,19)(94 - 20) + (1,5 - 1,35) \cdot 2280] \\
&= 159,9 \text{ грн/тонну}
\end{aligned}$$

Додаток Ж

Визначення зменшення кількості викидів вуглекислого газу в навколишнє середовище

Визначимо об'ємні витрати природного газу на утворення водяної пари, теплота якої поглинається флютингом в періоді нагрівання:

– за $g = 112 \text{ г/м}^2$

$$V_{\text{пг}} = \frac{Q_{\text{нагр}}}{Q_{\text{пг}}} = \frac{2,591}{20,61} = 0,126 \text{ м}^3/\text{с}$$

де $Q_{\text{нагр}}$ – тепловий потік до флютингу в періоді нагрівання, МВт; $Q_{\text{пг}}$ – кількість теплоти, що передається до флютингу від водяної пари, що виробляється шляхом спалювання 1 м^3 природного газу, МДж/м³;

– за $g = 125 \text{ г/м}^2$

$$V_{\text{пг}} = \frac{Q_{\text{нагр}}}{Q_{\text{пг}}} = \frac{2,892}{20,61} = 0,140 \text{ м}^3/\text{с}$$

– за $g = 140 \text{ г/м}^2$

$$V_{\text{пг}} = \frac{Q_{\text{нагр}}}{Q_{\text{пг}}} = \frac{3,239}{20,61} = 0,157 \text{ м}^3/\text{с}$$

– за $g = 200 \text{ г/м}^2$

$$V_{\text{пг}} = \frac{Q_{\text{нагр}}}{Q_{\text{пг}}} = \frac{4,627}{20,61} = 0,225 \text{ м}^3/\text{с}$$

Кількість утвореного вуглекислого газу при спалюванні такої кількості природного газу протягом однієї секунди становить:

– за $g = 112 \text{ г/м}^2$

$$V_{\text{CO}_2} = k_{\text{CO}_2} V_{\text{пг}} = 1,08 \cdot 0,126 = 0,136 \text{ м}^3/\text{с}$$

де k_{CO_2} – об'ємний коефіцієнт утворення CO_2 з природного газу;

– за $g = 125 \text{ г/м}^2$

$$V_{\text{CO}_2} = k_{\text{CO}_2} V_{\text{пг}} = 1,08 \cdot 0,140 = 0,152 \text{ м}^3/\text{с}$$

– за $g = 140 \text{ г/м}^2$

$$V_{CO_2} = k_{CO_2} V_{\text{пг}} = 1,08 \cdot 0,157 = 0,170 \text{ м}^3/\text{с}$$

– за $g = 200 \text{ г/м}^2$

$$V_{CO_2} = k_{CO_2} V_{\text{пг}} = 1,08 \cdot 0,225 = 0,242 \text{ м}^3/\text{с}$$

Визначимо кількість вуглекислого газу, що утворюється шляхом згорання природного газу протягом року (ідентично тривалості за двозонної тарифікації електроенергії):

– за $g = 112 \text{ г/м}^2$

$$V_{p\ CO_2} = 3600 V_{CO_2} \tau_p \tau_d = 3600 \cdot 0,136 \cdot 350 \cdot 8 = 1368851 \text{ м}^3 \approx 1,369 \text{ млн м}^3$$

де 3600 – переведення часу в секунди; τ_p – кількість робочих днів для ПРМ в році, днів; τ_d – кількість годин в нічному періоді за відповідної тарифікації електроенергії, год;

– за $g = 125 \text{ г/м}^2$

$$V_{p\ CO_2} = 3600 V_{CO_2} \tau_p \tau_d = 3600 \cdot 0,152 \cdot 350 \cdot 8 = 1527735 \text{ м}^3 \approx 1,528 \text{ млн м}^3$$

– за $g = 140 \text{ г/м}^2$

$$V_{p\ CO_2} = 3600 V_{CO_2} \tau_p \tau_d = 3600 \cdot 0,170 \cdot 350 \cdot 8 = 1711063 \text{ м}^3 \approx 1,711 \text{ млн м}^3$$

– за $g = 200 \text{ г/м}^2$

$$V_{p\ CO_2} = 3600 V_{CO_2} \tau_p \tau_d = 3600 \cdot 0,242 \cdot 350 \cdot 8 = 2,444376 \text{ м}^3 \approx 2,444 \text{ млн м}^3$$

Визначимо кількість вуглекислого газу, що утворюється шляхом згорання природного газу протягом року (ідентично тривалості за тризонної тарифікації електроенергії):

– за $g = 112 \text{ г/м}^2$

$$V_{p\ CO_2} = 3600 V_{CO_2} \tau_p \tau_d = 3600 \cdot 0,136 \cdot 350 \cdot 7 = 1197744 \text{ м}^3 \approx 1,198 \text{ млн м}^3$$

– за $g = 125 \text{ г/м}^2$

$$V_{p\,CO_2} = 3600V_{CO_2}\tau_p\tau_d = 3600 \cdot 0,152 \cdot 350 \cdot 7 = 1336768 \text{ м}^3 \approx 1,337 \text{ млн м}^3$$

$$- \text{ за } g = 140 \text{ г/м}^2$$

$$V_{p\,CO_2} = 3600V_{CO_2}\tau_p\tau_d = 3600 \cdot 0,170 \cdot 350 \cdot 7 = 1497180 \text{ м}^3 \approx 1,497 \text{ млн м}^3$$

$$- \text{ за } g = 200 \text{ г/м}^2$$

$$V_{p\,CO_2} = 3600V_{CO_2}\tau_p\tau_d = 3600 \cdot 0,242 \cdot 350 \cdot 7 = 2138829 \text{ м}^3 \approx 2,139 \text{ млн м}^3$$